Vol.11, No.3, Fall 2022, pp.189-224 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2021.72253.1102 Open access

Investigating the Indicators Resulting from Remote Sensing Technology in Drought Assessment using MODIS Images (Case Study: Qom, Isfahan, Chaharmahal and Bakhtiari, and Markazi Provinces)

Saleh Arekhi[a*], Marzieh Barzegar Savasari[b], Somia Emadaddian[a]

[a] *Assistant Professor, Geography Department, Human Sciences College, Golestan University, Gorgan, Iran*
[b] *MSc Student, Human Sciences College, Golestan University, Gorgan, Iran*

Received: 31 August 2021 ***Revised: 10 December 2021*** ***Accepted: 18 December 2021***

Abstract

Drought is a situation of lack of rainfall and rising temperatures that occurs in any geographical area and in any climate, even in humid areas. The frequency and severity of drought are higher in arid and semi-arid regions. Drought occurs without notice and has a wide range of impacts unlike other natural disasters. The damage caused by drought is intangible but very large and costly. Therefore, the basis of a regular program for better management according to past events requires drought monitoring. Meteorological drought indices are calculated directly from meteorological data such as rainfall. In the absence of such data, they will not be useful in monitoring drought. Therefore, remote sensing technique can be a useful tool in drought monitoring. In this study, the relationship between standardized precipitation index (SPI index) and remote sensing indices of VCI, TCI and VHI in Isfahan, Chaharmahal and Bakhtiari, Markazi, and Qom provinces was investigated. Using satellite images of Modis Terra sensor and precipitation data of rain gauge and synoptic stations located in the studied area, the changes occurred over a period of 10 years was calculated. For this purpose, four months (April, May, June, and July) were selected as a sample by reviewing the data of existing stations and using the standardized precipitation index (SPI) model. In this study, due to time accuracy, high spectrum coverage, ease of access, no need for atmospheric correction and ground reference, images with code (MOD11A2 and MOD13A2) of Modis satellite sensor products related to the years 2011 to 2020 due to confidence of wet and drought phenomena was used and then SPI index was compared with VCI, TCI, and VHI indices in combination. The results of drought monitoring showed that during the ten-year period, there was severe drought in some years, and in the same year, less rainfall occurred. In 2020, for example, the drought was very severe, and in 2011 it was very wet. The results of the correlation between SPI index and remote sensing indices showed that SPI index has the highest correlation with VCI index at the level of 0.01. It was found that MODIS images and constructed indices have the necessary capability for drought monitoring. The results of this study can be a good option for decision makers to monitor, investigate and resolve drought conditions and double the need to define an index.

Keywords: Drought, SPI index, VCI index, TCI, VHI, Central Iran

*. Corresponding author: Saleh Arekhi E-mail: s.arekhi@gu.ac.ir Tel: + 989113690648

How to cite this Article: Arekhi, S., Barzegar Savasari, M., & Emadodin, S. (2022). Investigating indicators resulting from remote sensing technology in drought assessment using MODIS images (Case study: Qom, Isfahan, Chaharmahal and Bakhtiari, and Markazi provinces). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(3), 189-224.
DOI:10.22067/geoeh.2021.72253.1102

Geography and Environmental Hazards
Volume 11, Issue 3 - Number 43, Fall 2022
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.72253.1102

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و سوم، پاییز ۱٤۰۱، صص ۲۲٤-۱۸۹

مقاله پژوهشی

بررسی کارایی شاخص‌های منتج از فناوری سنجش‌ازدور VCI، TCI و VHI در ارزیابی خشکسالی با تصاویر مودیس (مطالعه موردی: مناطق مرکزی ایران)

صالح آرخی[۱]– استادیار جغرافیا، گروه جغرافیا و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

مرضیه برزگر سواسری– دانشجوی کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، گروه جغرافیا و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

سمیّه عمادالدین– استادیار جغرافیا، گروه جغرافیا و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/٦/۹ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۰/۹/۱۹ تاریخ تصویب: ۱٤۰۰/۹/۲۷

چکیده

خشکسالی وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دما است که در هر منطقه جغرافیایی و در هر اقلیمی، حتی در مناطق مرطوب رخ می‌دهد که فراوانی و شدت وقوع آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیشتر است. خشکسالی بدون اعلام قبلی رخ می‌دهد و دامنه تأثیر آن بر خلاف وقایع طبیعی دیگر بسیار وسیع می باشد. خسارات ناشی از خشکسالی غیرملموس ولی بسیار وسیع و پر هزینه است. لذا اساس یک برنامه منظم برای مدیریت بهتر طبق رخدادهای گذشته پایش خشکسالی را ایجاب می‌کند. شاخص‌های خشکسالی هواشناسی مستقیماً از روی داده‌های هواشناسی نظیر بارندگی محاسبه می‌شوند و در صورت فقدان داده‌های مذکور، در پایش خشکسالی مفید واقع نخواهند شد. لذا تکنیک سنجش‌ازدور می‌تواند ابزاری مفید در پایش خشکسالی به شمار رود. در این تحقیق به بررسی ارتباط بین شاخص خشکسالی هواشناسی (شاخص SPI) و شاخص‌های سنجش‌ازدوری VCI، TCI و VHI در استان‌های اصفهان،

۱ نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۱۳٦۹۰٦٤۸ Email : s.arekhi@gu.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

آرخی، صالح؛ برزگر سواسری، مرضیه؛ عمادالدین، سمیه. (۱٤۰۱). بررسی کارایی شاخص‌های منتج از فناوری سنجش از دور VCI، TCIو VHI در ارزیابی خشکسالی با تصاویر مودیس (مطالعه موردی: مناطق مرکزی ایران). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۳). صص ۲۲٤-۱۸۹

https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.72253.1102

چهارمحال و بختیاری، مرکزی و قم پرداخته شـده اسـت. در این راسـتا، با بهره‌گیری از تصـاویر ماهواره مودیس سـنجنده ترآ و داده‌های بارش ایسـتگاه‌های باران‌سـنجی و سـینوپتیک واقع در منطقه موردمطالعه، آشـکارسازی تغییرات رخ داده در بازه زمانی ۱۰ ساله محاسبه گردید. بدین منظور ابتدا با بررسی داده‌های ایسـتگاه‌های موجود و با اسـتفاده از مدل شـاخص بارش اسـتاندارد شـده (SPI) چهار ماه (فروردین، اردیبهشـت، خرداد و تیر) به‌عنوان نمونه انتخاب شـد. در این مطالعه با توجه به‌دقت زمانی، پوشش طیفی بالا، سـهولت دسترسی، عدم نیاز به تصحیح اتمسفری و زمین مرجع نمودن، تصاویر با کد (MOD11A2 و MOD13A2) از محصـولات ماهواره مودیس سـنجنده ترا مربوط به سـال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ به دلیل اطمینان از وجود پدیده ترسالی و خشکسالی استفاده شد و سپس شاخص SPI با شاخص‌های VCI، TCI و VHI به‌صـورت تلفیقی مورد مقایسـه قرار گرفت. نتایج پایش خشـکسـالی نشـان داد که طی این دوره ده‌سـاله در برخی از سال‌ها خشکسالی شدید وجود داشته که در همان سال نیز بارش به میزان کمتری رخ داده اسـت. برای مثال در سال ۲۰۲۰ این خشکسالی بسیار شدید بوده است و در سال ۲۰۱۱ ترسالی بسیار شـدیدی را نشان داد. نتایج حاصل از همبستگی بین شاخص SPI و شاخص‌های سنجش‌ازدوری نشان داد که شـاخص SPI بالاترین همبسـتگی را با شاخص VCI در سطح ۰/۰۱ دارد که مشخص گردید تصاویر MODIS و شـاخص‌های سـاخته شده دارای قابلیت لازم برای پایش خشکسالی می‌باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند گزینه مناسـبی برای تصمیم‌گیران به‌منظور بررسی نظارت، بررسی و حل‌وفصل شرایط خشکسالی مؤثر باشد و ضرورت تعریف نمایه‌ای را دو چندان کند.

کلیدواژه‌ها: خشکسالی، شاخص SPI، شاخص VCI، TCI، VHI، مناطق مرکزی ایران.

۱- مقدمه

خشکسالی ازجمله بلایای طبیعی با شروعی آرام و ماهیتی خزنده است که تقریباً در تمام اقلیم‌ها رخ می‌دهد و در یـک دوره زمـانـی نسـبتـاً طـولـانـی، اقلیم، منـابع آبی، کشـاورزی، محیط‌زیسـت و حتی بخش‌هـای اجتماعی و اقتصادی جامعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شاخص‌های معمول ارزیابی و پایش خشکسالی اغلب وابسته به داده‌های بارش هسـتند. یکی از مهم‌ترین این شـاخص‌ها، شـاخص بارش اسـتاندارد شـده (SPI) است. داده‌های هواشـناسی به علت دسترسی محدود به محل اندازه‌گیری و در مواردی به دلیل ناقص بودن اطلاعات آن برای ارزیابی به‌ویژه در مناطق بزرگ چندان مناسـب نیسـت؛ بنابراین، اسـتفاده از تکنیک‌های سـنجش‌ازدور، تصـاویر ماهواره‌ای، تعریف شاخص‌های مرتبط با سنجش‌ازدور به دلیل ارزان و قابل تکرار بودن، به‌روز بودن و در برگرفتن سطح وسیعی از منطقه مطالعاتی می‌تواند ضمن پوشش کاستی‌های مرتبط با داده‌های هواشناسی ایستگاهی، ارتباط میان خشکسالی هواشناسی و خشکسالی کشاورزی را در پایش دقیق‌تر برقرار سازد (رستمی و همکاران، ۲۰۱۶). کمبود بارش در یک

منطقه برای دوره‌های زمانی طولانی‌مدت به‌عنوان خشکسالی شناخته می‌شود. این کمبود آب در چرخهٔ هیدرولوژیکی منتشر می‌شود و انواع مختلف خشکسالی را ایجاد می‌کند (فوریلو و گودونگو[1]، ۲۰۱۰). بروز خشکسالی و کاهش بارش بر منابع آب و کشاورزی در هر منطقه تأثیرگذار است (خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۸۹). تغییرپذیری منابع آب زیرزمینی از تغییرات اقلیمی ناشی از فرایندهای هیدرولوژیکی مانند بارش، تبخیر و تعرق و تعامل با آب سطحی انجام می‌گیرد (چنگ و همکاران[2]، ۲۰۰۴). منظور از پایش خشکسالی ارائه اطلاعات به هنگام از دوام، شدت و توسعه جغرافیایی خشکسالی در یک ناحیه به‌منظور اتخاذ اقدامات مناسب برای مقابله با آثار زیان‌بار خشکسالی است. در دهه‌های گذشته معمولاً تحلیل خشکسالی به‌صورت توصیفی انجام می‌گرفت و کمتر به تحلیل کمی پرداخته می‌شد (کارال و همکاران[3]، ۱۹۸۹). اصولاً برای تحلیل کمی خشکسالی، وجود یک شاخص مشخص برای تعیین دقیق دوره‌های مرطوب و خشک بسیار ضروری است. شروع استفاده از شاخص‌های جامع را می‌توان با شاخص‌هایی که پالمر در سال ۱۹٦۵ معرفی کرد، دانست. شاخص‌های هواشناسی با در نظر گرفتن پارامترهای هواشناسی مانند میزان بارش، رطوبت و دما، خشکسالی تعریف می‌کنند (سیلوا[4]، ۲۰۰۳). نظر به اینکه شاخص‌های سنتی خشکسالی تنها برای یک محل معتبر هستند و قدرت تفکیک مکانی لازم را برای ارزیابی خشکسالی ندارند، همچنین این شاخص‌ها به اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی وابسته‌اند و ایستگاه‌ها اغلب با فاصله مکانی زیادی از هم توزیع شده‌اند، این مسئله بر قابلیت اعتماد این شاخص‌ها تأثیر منفی خواهد داشت. ازاین‌رو، شاخص‌های ماهواره‌ای نظر به دارا بودن قدرت مکانی و زمانی بالا و امکان بررسی شرایط مختلف استفاده شده‌اند. شروع استفاده از فن‌آوری سنجش‌ازدور برای پایش خشکسالی، به کاربرد آن در استخراج اطلاعات از پوشش گیاهی زمین باز می‌گردد. یک مرتبه کالیبره کردن اطلاعات ماهواره‌ای با واقعیت زمینی، امکان استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای پایش شروع خشکسالی، واکنش پوشش گیاهی به خشکسالی و بهبود پس از استرس را فراهم می‌کند. در دهه‌های اخیر مدل‌های زیادی در رابطه با پایش خشکسالی با استفاده از سنجش‌ازدور ارائه شده است که عموماً بر پایه شاخص‌های گیاهی، دمای سطح زمین، محتوای آب گیاه و وضعیت گیاه است. برخی از مدل‌ها عبارت‌اند از: شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)[5]، شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)[6]، شاخص وضعیت دمایی (TCI)[7]، شاخص LST (بایارجارگل و همکاران[8]، ۲۰۰٦)، شاخص‌های NDVI، NDWI، LST/NDVI و غیره (گو و همکاران[9]، ۲۰۰۷).

1 Fiorillo and Guadagno
2 Chen et al
3 Karel et al
4 Silva
5 Vegetation Condition Index
6 Vegetation Health Index
7 Temperature Condition Index
8 Bayarjargal et al
9 Gu et al

ازآنجایی‌که امروزه سنجنده‌های متعددی در مطالعات پایش خشکسالی به کار می‌روند، در مطالعه حاضر از اطلاعات سنجنده MODIS [1] استفاده شد، زیرا در مقایسه با سنجنده‌های دیگر، سنجنده مودیس با داشتن باندهای مختلف و طیف الکترومغناطیسی بالقوه برای نظارت بر خشکسالی مناسب‌تر است (سکاتو و همکاران[2]، ۲۰۰۱). ازاین‌رو، از سال ۲۰۰۰ پس از کسب اولین داده‌های ماهواره‌ای از این سنجنده، استفاده از اطلاعات آن به‌منظور ارزیابی و پایش خشکسالی مد نظر قرار گرفت. دامنه وسیعی از شاخص‌های مبتنی بر داده‌های مودیس برای نظارت بر خشکسالی در مناطق کشاورزی و نیمه‌خشک تاکنون ارائه شده است.

در همین خصوص، تحقیقات متعددی در سطح جهان و ایران صورت پذیرفته است که در بیشتر آن‌ها با به‌کارگیری داده‌ها و روش‌های سنجش‌ازدور، اقدام به پهنه‌بندی شدت و وسعت خشکسالی شده است. جی و پیترز[3] (۲۰۰۳)، ارتباط بین بارش استاندارد شده و شاخص NDVI [4] را موردبررسی قرار دادند. بیشترین همبستگی آن‌ها در دوره‌های میانی رشد (۳ ماه) بوده است. همچنین به وجود تأخیر زمانی عکس‌العمل پوشش گیاهی نسبت به بارش اشاره شده است. روسوینتیارتی و همکاران[5] (۲۰۱۰) به برآورد خشکسالی در جزیره جاوای اندونزی پرداختند. آن‌ها برای این کار از تصاویر MODIS برای شاخص EVI[6] و دمای سطح زمین LST [7] استفاده کردند. شاخص VHI با استفاده از VCI و TCI به دست آمده است و در آخر با استفاده از نقشه VHI سلامت پوشش گیاهی در جزیره جاوا به دست آمده است.

زامبرانو و همکاران[8] (۲۰۱۶) در منطقه بیوبیو شیلی به‌منظور بررسی خشکسالی کشاورزی، شاخص‌های VCI و SPIدر مقیاس زمانی یک تا شش ماه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ در ۱۸ ایستگاه موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، SPI سه‌ماهه بیشترین همبستگی (r=۰/۷۷) را با شاخص VCI دارد. پای و همکاران[9] (۲۰۱۸) مطالعه‌ای در کشور چین با هدف پایش پویایی گیاه با استفاده از شاخص‌های TCI، VCI و VHI برای دوره آماری ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۳ انجام دادند و درنهایت ذکر کردند که رابطه بین TCI و VCI در نواحی مختلف متفاوت است.

اسیک و یلدریم[10] (۲۰۱۸) خشکسالی کشاورزی در دشت کاواکدره ترکیه را به‌وسیله شاخص‌های NDVI و SAVI و دمای سطح ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که هر دو شاخص مذکور با دمای سطح طی فصل آبیاری،

1 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
2 Ceccato et al
3 Ji and Peters
4 Normalized Difference vegetation Index
5 Roswintiarti et al
6 Enhanced Vegetation Index
7 Land Surface Temperature
8 Zambrano et al
9 Pei et al
10 Asik and Yildirim

جایی که درجه حرارت افزایش یافته و بارندگی کاهش یافته، به‌طور مؤثری رطوبت قابل‌دسترس را کاهش داده است، همبستگی منفی دارند.

الحق و ژانگ[1] (۲۰۱۸) مطالعه‌ای را با هدف بررسی و تحلیل ویژگی‌های خشکسالی بر پایهٔ دو شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و شاخص شدت خشکسالی DSI و تأثیر خشکسالی بر بهره‌وری ذرت خوشه‌ای در سودان از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ انجام دادند. برای شناسایی مناطق خشک و مرطوب، از داده‌های بارش ماهوارهٔ TRMM از سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ استفاده و در مقیاس فصلی (جولای- اکتبر) نقشه‌برداری شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد وضعیت خشکی در سراسر سودان در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف متغیر است. نتایج DSI نشان داد بیشتر مناطق سودان از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ متأثر از خشکسالی بوده است.

در بخش مطالعات داخلی نیز پژوهش‌های انجام پذیرفته است که در ذیل به آن‌ها پرداخته می‌شود: محمودزاده و همکاران (۱۳۸۷) از دو شاخص SPI و NDVI طی سال‌های ۲۰۰۳-۱۹۹۸ برای بررسی خشکسالی در منطقه فریدون‌شهر استفاده کرده و درنهایت این دو شاخص را با هم مقایسه نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که بین تصاویر NDVI ماه‌های آوریل و می و SPI دسامبر و ژانویه همبستگی معناداری وجود دارد. پرویز و همکاران (۱۳۸۸)، به بررسی عملکرد دو شاخص NDVI و VCI در پایش خشکسالی در حوضه آبریز سفیدرود با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS پرداختند. نتایج بیان می‌کند که شاخص VCI نسبت به شاخص NDVI در تعیین شرایط خشکسالی مؤثرتر است. غفوریان (۱۳۹۳) طی سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ در استان خراسان رضوی، با استفاده از شاخص SPI داده‌های زمینی و داده‌های ماهانه ماهواره TRMM، خشکسالی در مقیاس‌های یک، سه، شش و نه‌ماهه را موردبررسی قرار دادند، نتایج نشان داد که به‌جز در مقیاس یک‌ماهه همبستگی نزدیکی بین داده‌های خشکسالی زمینی و ماهواره‌ای وجود دارد. اورنگی و همکاران[2] (۲۰۱۱) به برآورد خشکسالی در استان فارس ایران با استفاده از تصاویر AVHRR و مقایسه با تصاویر ماهواره‌ای SPOT پرداختند. در این پژوهش، از شاخص‌های VCI، TCI و VHI در مقایسه با شاخص‌های SPI، SWI و DSI استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که این روش‌ها برای آگاهی از خشکسالی اولیه مناسب هستند و می‌توانند برای مدیریت ریسک خشکسالی در آب‌وهوای نیمه‌خشک ازجمله استان فارس در ایران استفاده شوند. شهاب‌فر و همکاران (۲۰۱۲) مطالعه خود را به‌منظور بررسی رابطه بارش (با استفاده از شاخص‌های زمینی CZI، Z و MCZI) و شاخص‌های سنجش‌ازدوری PDI، EVI، VCI و MPDI در فاصله زمانی ۲۰۰۰-۲۰۰۵ انجام داند. نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل رگرسیون خطی نشان داد که تمام این شاخص‌های سنجش از راه دور به‌طورکلی، رابطه آماری معنی‌دار با داده‌های بارش دارد. بااین‌حال، درجه ارتباط میان مناطق مختلف آب و هوایی متفاوت است. VCI و EVI ضعیف‌ترین رابطه را به‌ویژه در مناطق خشک نشان دادند. در مقابل، ارتباط

1 Elhag and Zhang
2 Owrangi et al

معنی‌داری بین MPDI و PDI و خشکسالی سطح منطقه وجود دارد. PDI برای برنامه‌های کاربردی خاک لخت و یا مراحل اولیه رشد پوشش گیاهی مناسب‌تر است، درحالی‌که MPDI هم برای سطوح با پوشش گیاهی، هم خاک لخت مؤثر است. پیش‌نمازاحمدی و همکاران (۱۳۹٦) خشکسالی شمال‌غرب ایران را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و TRMM بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد سال ۲۰۰۸، بیشترین خشکسالی و ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ کمترین خشکسالی را داشته است.

حمزه و همکاران (۱۳۹٦) در پژوهشی با عنوان پایش زمانی و مکانی خشکسالی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور موردمطالعه: استان مرکزی ایران، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مادیس به بررسی الگوهای خشکسالی پرداخته است. نتایج حاصل از شاخص گیاهی VCI در مقیاس فصلی با شرایط اقلیمی محدوده تطابق بیشتری دارد، به‌گونه‌ای که این شاخص بهترین شاخص جهت پایش خشکسالی انتخاب گردید. سلطانی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان پایش خشکسالی منطقه‌ای با استفاده از تصاویر لندست (منطقه موردمطالعه: شهرستان کرمانشاه) به پایش خشکسالی و سلامت پوشش گیاهی در منطقه کرمانشاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان دهنده این موضوع است که تصاویر لندست و شاخص‌های سنجش‌ازدوری ساخته شده دارای قابلیت لازم و کافی برای پایش خشکسالی می‌باشد.

در منابع مختلف (لین[1]، ۲۰۰۳؛ حجازی‌زاده و جوی‌زاده، ۱۳۹۸؛ امیدوار، ۱۳۹۳) به مجموعه متنوعی از روش‌ها برای تحلیل خشکسالی اشاره می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: روش‌های مطالعه بیلان آبی مناطق، روش‌های تحلیل جریان، روش‌های تحلیل داده‌های بارندگی، روش‌های تحلیل همدیدی (سینوپتیک)، روش‌های استفاده از اطلاعات ژئومورفولوژیک، روش‌های سنجش‌ازدور، روش‌های تعیین شاخص‌های خشکسالی و ...؛ روش اخیر که بیشتر بر روش‌ها و الگوهای ریاضی و تحلیل داده‌های کمی اقلیمی مبتنی است، کاربرد فراوانی برای تحلیل خشکسالی دارد (نوروزی و محمدی، ۱۳۹۵).

شاخص‌های گیاهی روش‌های پرکاربردی برای پایش خشکسالی از طریق داده‌های ماهواره‌ای هستند. ولی مطالعات صورت گرفته با توجه به محل اجرا و شرایط محیطی و شاخص مورداستفاده نتایج متفاوتی را نشان می‌دهند و درنتیجه امکان مقایسه کلی بین شاخص‌ها ازنظر صحت داده‌ها با شرایط گیاه و درنتیجه بررسی خشکسالی وجود ندارد. علاوه بر این، اغلب این مطالعات در مناطق با بارش حدود نرمال صورت گرفته است. با توجه به شرایط اقلیمی ایران، نمی‌توان برای مطالعه خشکسالی از هر شاخص گیاهی در هر منطقه‌ای استفاده نموده و نتایج مشابهی را انتظار داشت. ازاین‌رو باید رابطه هر یک از شاخص‌های ماهواره‌ای با خشکسالی در منطقه مطالعاتی مدنظر موردبررسی قرار گیرد؛ بنابراین، با توجه به تحقیقات فوق، در پژوهش حاضر، هدف ارزیابی، پایش مکانی و زمانی خشکسالی با

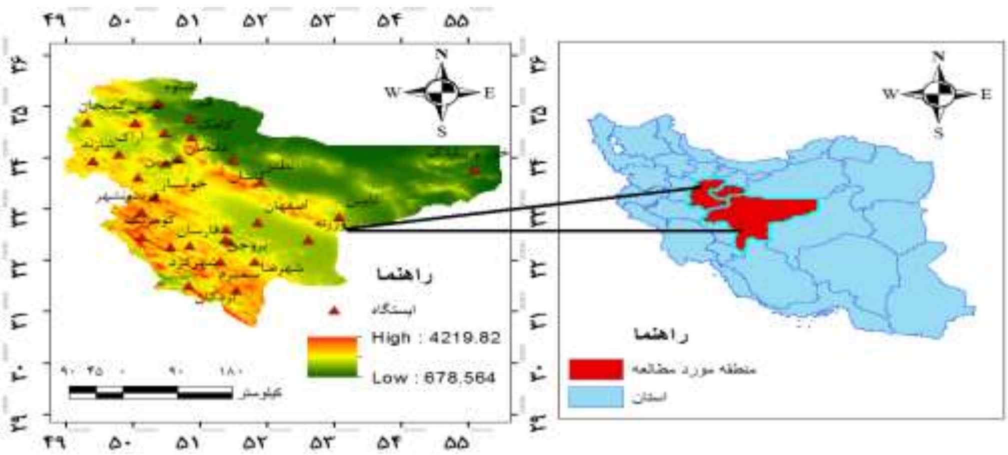
1 Lein

استـفاده از شـاخص هواشـناسـی SPI و شـاخص‌های سـنجش‌ازدوری VCI، VHI و TCI در اسـتان‌های اصفهان، مرکزی، چهارمحال‌وبختیاری و قم برای سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ است و در ادامه همبستگی بین شاخص زمینی SPI و شاخص‌های منتخب ماهواره‌ای بررسی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه موردمطالعه

کشـور ایران همانند بسـیاری از کشـورهای دیگر خاورمیانه از نظر تأمین آب در وضعیت مناسبی قرار ندارد. این کشـور به دلیل قرار گرفتن روی کمربند خشـک جغرافیایی و نوار بیابانی ۲۵ تا۴۰ درجه عرض شمالی، جزء مناطق کم‌باران جهان به شمار می‌آید. استان‌های قم، اصفهان، چهار محال و بختیاری و مرکزی نیز ازجمله استان‌هایی هستند که دربارۀ وضـعیت خشکسالی آن‌ها در چند سال اخیر، مدام هشدار داده شده است. مطالعه خشکسالی در این چهار اسـتان، به دلیل حساسیت این استان‌ها و همچنین جمعیت بسیار زیادی که در خود جای داده است، اهمیت ویژه‌ای دارد. به همین دلیل، اسـتان‌های فوق در این پژوهش، انتخاب شـد. اسـتان‌های فوق در مرکز ایران در محدوده طول جغرافیـایی ٤۹ درجه تا ٥٥ درجه و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه تا ۳۵ درجه بررسـی شـده‌اند. مسـاحت منطقه موردمطالعه ١٦٣٩٧٧ کیلومترمربع می‌باشـد. میانگین بارش سالانه منطقه موردمطالعه بین ١٤٠ تا ٦٠٠ میلیمتر در تغییر اسـت و از لحاظ اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود. از جنوب به شمال این منطقه، به دلیل شـرایط توپوگرافی و طبیعی متفاوت، اقلیم متنوعی دیده می‌شـود. قسمت‌های جنوبی بیشتر زمستان‌های سرد و تابسـتان‌های معتدل و قسـمت‌های شمالی زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم دارد (خدایی و همکاران، ۱۳۹۵). در شکل ۱، موقعیت منطقه در کشور همراه با ایستگاه‌های سـینوپتیک و کلیماتولوژی نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و ایستگاه‌های محدوده موردمطالعه

۲-۲- سنجنده مودیس

مودیس (اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط) سنجنده‌ای است که بر روی ماهواره ترا (EOS-AM) قرار داده شده است. سنجنده مودیس ماهوارهٔ ترا، هر دو روز یکبار از تمام سطح زمین تصویربرداری می‌کند و داده‌هایی در ۳٦ باند طیفی اخذ می‌کند. سنجندهٔ مودیس دارای حساسیت رادیومتریکی بالا (۱۲ بیت) و در ۳٦ باند طیفی می‌باشد و دامنهٔ طیفی آن از طول‌موج‌های ۰/٤ تا ۱٤/٤ میکرومتر می‌باشد که این امر می‌تواند نیازهای کاربران مختلف را برطرف سازد. این سنجنده در ۲ باند طیفی تصاویر با قدرت تفکیک اسمی ۲۵۰ متر، در ٤ باند طیفی تصاویری با قدرت تفکیک اسمی ۵۰۰ متر و در ۳۰ باند دیگر نیز تصاویری با قدرت تفکیک ۱۰۰۰ متر برداشت می‌کند.

۲-۳- داده‌های زمینی

در این پژوهش، از آمار بارندگی ۲۹ ایستگاه هواشناسی واقع در استان‌های اصفهان، قم، مرکزی و چهارمحال و بختیاری استفاده شد. ایستگاه‌ها بر مبنای طول دوره آماری، پوشش مناسب مکانی (شکل ۲) در منطقه موردمطالعه و قابل‌اعتماد بودن داده‌های آماری آن‌ها انتخاب شده‌اند. دوره زمانی موردمطالعه در این تحقیق از سال ۲۰۱۱ میلادی تا سال ۲۰۲۰ میلادی می‌باشد. ازآنجایی‌که داده‌های مورداستفاده برای مقایسه از نظر مقیاس زمانی باید هم‌خوانی داشته باشند و با توجه به این که داده‌های ماهواره TERRA به‌صورت میلادی و داده‌های ماهانه سازمان آب منطقه‌ای به‌صورت شمسی می‌باشد، از داده‌های روزانه سازمان آب منطقه‌ای برای این تحقیق استفاده گردید. داده‌های نهایی براساس مطابقت دقیق با روزهای ماه میلادی، با جمع داده‌های روزانه و تبدیل آن‌ها به داده‌های ماهانه میلادی به دست آمد (تبدیل هجری شمسی به میلادی).

۲-٤- داده‌های ماهواره‌ای

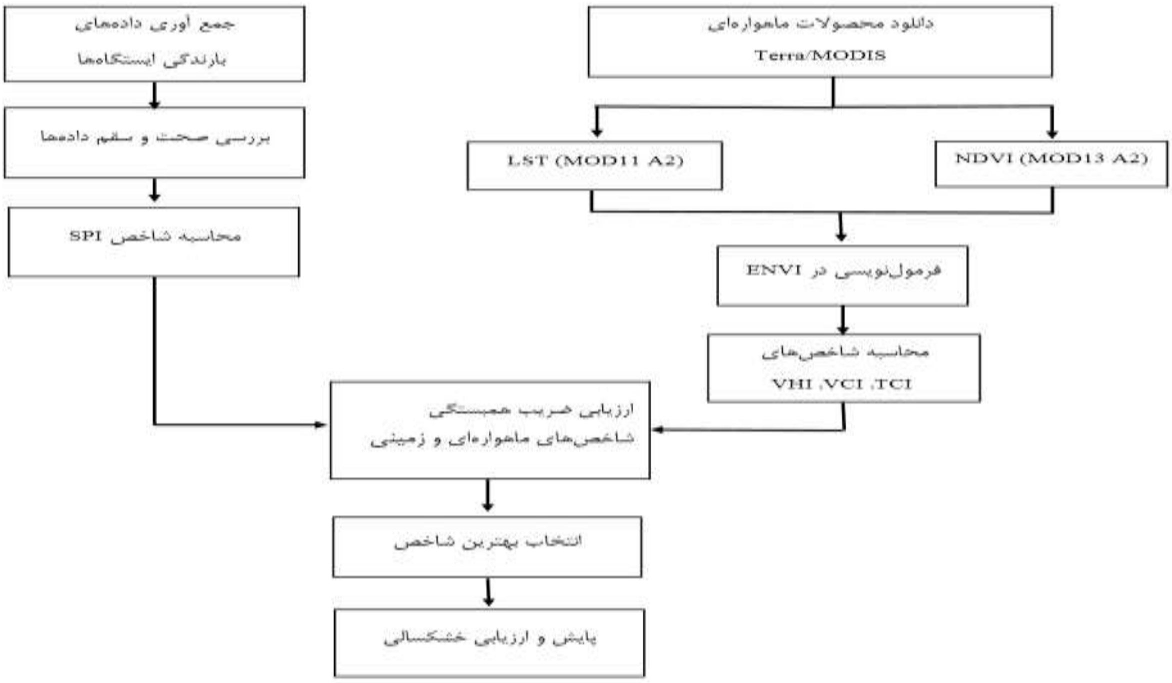
داده‌های دورسنجی مورداستفاده شامل داده‌های سنجنده MODIS از سری تصاویر ماهواره TERRA می‌باشد. بدین منظور از محصولات شانزده روزه شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) در قالب فایل MOD13A2 و محصولات هشت روزه دمای سطح زمین (LST) در قالب فایل MOD11A2 با فرمت hdf و قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر استفاده گردید، که به دلیل تطابق زمانی، محصولات هشت روزه نیز به شانزده روزه تبدیل شد. از این محصولات تعداد ۸۰ تصویر MOD13A2 و ۱٦۰ تصویر MOD11A2 از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ برای تمامی ماههای (فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیرماه) تهیه گردید. این تصاویر پس از دریافت توسط اطلاعات موجود در شناسه تصویر و ابزار Modtool اضافه شده در نرم افزار ENVI فراخوانی و سیستم مختصات آن‌ها به سیستم مختصات جغرافیایی تبدیل گردید و سپس با فرمت tif. ذخیره گردید. لازم به سادآوری است، از آنجا که تصاویر ماهواره‌ای

مودیس دارای سیستم سینوسوئیدال یا سینوسی[1] هستند، سیستم مختصات آن‌ها به جغرافیایی تغییر داده شد تا همخوانی لازم با نقشه توپوگرافی وجود داشته باشد. سپس با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰، محدوده ٤ استان از کل تصویر جدا و سپس اقدام به محاسبه شاخص‌ها شد.

۵-۲- روش تحقیق

تحقیق حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع موردبررسی، از نوع توصیفی - تحلیلی است و از نوع مطالعات کاربردی با تأکید بر روش‌های کمی است. در این مطالعه با توجه به دقت زمانی، پوشش طیفی بالا، سهولت دسترسی، عدم نیاز به تصحیح اتمسفری و زمین مرجع نمودن تصاویر از محصولات ماهواره مودیس سنجنده ترا مربوط به سال های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ به دلیل اطمینان از وجود پدیده ترسالی و خشکسالی استفاده شد. اطلاعات سنجش‌ازدور مورداستفاده در این پژوهش، شامل محصولات آماده MOD13A2 و MOD11A2 است که به ترتیب مربوط به سری های زمانی شاخص NDVI و LST است که مستقیماً از تارنمای Earth Data Search دریافت شده و نیاز به تصحیح هندسی، رادیومتریکی و اتمسفری ندارند. در مرحله بعد با بررسی داده‌های باران‌سنجی و سینوپتیک ایستگاه‌های موجود و با استفاده از مدل شاخص بارش استاندارد شده (SPI) چهار ماه (فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیر- مصادف با دوره رشد پوشش گیاهی و خشکسالی) به‌عنوان نمونه انتخاب شد. سپس به مقایسه شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، وضیت درجه حرارت (TCI) و سلامت پوشش گیاهی (VHI) در این چهار ماه پرداخته شد تا تفاوت‌های این شاخص‌ها در طی چهار ماه مشخص شود. جهت پردازش داده‌های اکسلی از نرم‌افزار ARCGIS و روش‌های زمین‌آماری بهره گرفته شد. همچنین به‌منظور برآورد همبستگی بین داده‌ها از ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید. شکل ۲ مراحل روش تحقیق را نشان می‌دهد.

---
1 Sinsuidal



شکل ۲- مراحل جریانی روش تحقیق

۲-۵-۱- معرفی مدل‌ها و شاخص‌های سنجش‌ازدوری خشکسالی

۲-۵-۱-۱- شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI)

شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI) کاربرد گسترده‌ای جهت تشخیص مناطق دارای پوشش گیاهی سالم از ناسالم و مناطق عاری از پوشش دارد. این شاخص وضعیت پوشش گیاهی را بر روی سطح زمین در مناطق وسیع نشـان می‌دهد. ارزش عددی شـاخص NDVI بین ۱- تا ۱ متغیر می‌باشد. ارزش‌های عددی مثبت مربوط به پوشش گیاهی متراکم و ارزش عددی صـفر و مقادیر نزدیک به آن مربوط به مناطق بدون پوشـش گیاهی اسـت و مکان‌های خیس و آب، ارقام نزدیک به ۱- را دارا هستند (هودل[1]، ۲۰۱۲). این شاخص از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$NDVI = \frac{P_{NIR} - P_{RED}}{P_{NIR} - P_{RED}}$$

کـه در آن P_{Red} باند قرمز (باند ۱ مودیس) و P_{NIR} باند مادون قرمز نزدیک (باند ۲ مودیس) اسـت. چون در این پژوهش از داده MOD13A2 سـنجده ترآ اسـتفاده شده است، لذا این شاخص به‌صورت آماده در اختیار کاربران قرار

1 Hodel

داده شــده است، تنها باید شاخص NDVI را در Scale Factor آن ضرب نمود تا مقادیر NDVI بین منفی ۱ و مثبت ۱ نمایان گردد. مشخصات محصول پوشش گیاهی و دمای سطوح زمین در جدول شماره ۱ قرار داده شده است.

جدول ۱- مشخصات محصول پوشش گیاهی و دمای سطوح زمین

SDS Name	Description	Units	Data Type	Fill Value	NoData Value	Valid Range	Scale Factor
1 km 16 days NDVI	1 km 16 days NDVI	NDVI	16-bit signed integer	-3000	N/A	-2000 to 10000	0.0001
LST_Day_1km	Daytime Land Surface Temperature	Kelvin	16-bit unsigned integer	0	N/A	7500 to 65535	0.02

۲-۵-۱-۲- شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

این نمایه توسط کوگان در سال ۱۹۹۷ پیشنهاد شد و بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید. شاخص VCI بر حسب درصد بیان می‌شود. اگر مقدار این نمایه بین ۵۰ تا ۱۰۰ باشد، نشان دهنده شرایط مطلوب خواهد بود و هرچه به صفر نزدیک‌تر شود، بیانگر وجود خشکسالی در منطقه می‌باشد.

$$VCI=[\frac{NDVI_i-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}}]\times ۱۰۰$$

در این رابطـه: $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ به ترتیب مقدار کمینه و بیشـــینه NDVI برای یک دوره زمانی در مدت زمان طولانی است. شاخص VCI از شاخص‌های مهم در تغییرات پوشش گیاهی محسوب می‌شود. در واقع می‌توان این نمایه را به نوعی شــاخص مقیاس شــده NDVI معرفی کرد. ازاین‌رو، پاســخ‌های این دو نمایه به تغییرات شرایط گیاه مشــابه خواهد بود. مقادیر کم VCI برای فواصــل زمانی پی در پی اشــاره به افزایش خشکسالی دارد (تنکابایل و همکاران[1]، ۲۰۰۳).

۲-۵-۱-۳- شاخص وضعیت دمایی (TCI)

شــاخص وضــعیت درجه حرارت، بر اســاس باند حرارتی تبدیل شده به دمای درخشندگی ارائه شده است. این شاخص برای تعیین دمای مرتبط با تنش پوشش گیاهی و همچنین تنش ناشی از رطوبت بیش از حد استفاده می‌شود. الگوریتم TCI مشابه به الگوریتم VCI است و بر اساس فرمول ذیل بدست می‌آید.

1 Thenkabail et al

$$TCI = \frac{BT_{max} - BT_i}{BT_{max} - BT_{min}} \times 100$$

در این رابطه، مقادیر BT دمای درخشایی (باند ۳۱) و i نشان دهنده سال جاری است. مقادیر بیشینه و کمینه BT از داده‌های ثبت شـده درازمدت برای هر سـال به دسـت می‌آید. هنگامی که مقدار TCI به ۱۰۰ درصد می‌رسد، BT برای این ماه برابر کمترین مقدار BT درازمدت برای پیکسل است. مقادیر کم TCI نزدیک به صفر درصد نشان دهنده هوای بسـیار گرم در سـال موردنظر است. هنگامی که TCI به صفر درصد می‌رسد، BT آن سال برابر بیشترین مقدار BT درازمدت برای پیکسـل اسـت. در مجموع برای مشـاهدات آب و هواشـناسـی، ارتباط بین حرارت سـطحی و رطوبت روی زمین، تأثیرات ناحیه‌ای خشکسالی را قبل از دست دادن توده‌های گیاهی کشف می‌کنند. ازاین‌رو، TCI می‌تواند نقش مهمی در پایش خشکسالی ایفا کند.

۲-۵-۱-٤- شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)

شاخص TCI و VCI به ترتیب شرایط دمایی و رطوبتی پوشش گیاهی را نشان می‌دهند. شاخص TCI مکملی مناسب برای VCI به منظور پایش خشکسالی است. هنگامی که این دو شاخص با یکدیگر استفاده شوند، ابزاری برای ارزیابی میزان محصول فراهم می‌شود. این شاخص نیز توسط کوگان در ۲۰۰۰ بیان شد. این شاخص بر اساس رابطهٔ زیر از ترکیب شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و شاخص وضعیت دمایی (TCI) محاسبه می‌شود.

$$VHI = 0.5 \times VCI + 0.5 \times TCI$$

در شاخص VHI اگر دیگر شرایط، نزدیک نرمال باشند، پوشش گیاهی در طول شکل‌گیری تاج پوشش (ظهور برگ) به رطوبت و در دوره گل‌دهی به دما حساسیت بیشتری دارد. از آن جایی که سهم رطوبت و دما در طی چرخه گیاهی به طور عادی نامشخص است، سهم VCI و TCI در شاخص VHI برابر در نظر گرفته می‌شـود (کوگان[1]، ۲۰۰۰).

۲-۵-۱-٥- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شـاخص استاندارد بارش (SPI) یکی از شاخص‌های اساسی در مطالعهٔ خشکسالی به‌شمار می‌آید که محاسبهٔ آن نیازمند داشـتن میانگین و انحراف معیار درازمدت مقادیر بارندگی برای دوره‌های موردمطالعه اسـت (بوناکوروس[2]، ۲۰۰۳). این شـاخص اسـاسـاً برای تعریف و پایش خشـکسالی و ترسالی ارائه شده است (تساکریس[3]، ۲۰۰٤) و به

---

1 Kogan
2 Bonaccorso
3 Tsakiris et al

تحلیل‌گر امکان می‌دهد تا تعداد وقایع خشـــکســـالی و ترســـالی اتفاق افتاده را برای هر گام زمانی دلخواه تعریف و شـناسـایی کند. از آنجا که این شـاخص بی‌بعد است، می‌توان به کمک آن اطلاعات مناطق مختلف را با هم مقایسه و نقشـه‌های گسـترهٔ خشـکسـالی را با دقت بیشتری تولید کرد (اگنیو[۱]، ۲۰۰۰). مکی و همکاران[۲](۱۹۹۳) برای ارزیابی خشـکسـالی، شـاخص SPI را ارائه دادند. این شـاخص به علت سادگی، استفاده از داده‌های قابل دسترس و قابلیت محاسـبه برای مقیاس زمانی دلخواه، مناسـب‌ترین نمایه برای تحلیل خشـکسـالی و تحلیل مکانی آن اسـت و امکان مطالعهٔ وضـعیت منابع آب در دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت را که در کشـاورزی، مطالعات جریان‌های سـطحی و آبخوان‌هـای زیرزمینی دارای اهمیت اســت، فراهم می‌کند (دبلیو و همکاران [۳]، ۲۰۰۱). هدف کلیدی این پژوهش ارزیابی پوشـش گیاهی و دمای سـطح زمین جهت تحلیل دوره خشـکسـالی و ترسـالی در استان‌های قم، چهارمحال بختیاری، اصـفهان و مرکزی با اسـتفاده از تصـاویر ماهواره مادیس سنجنده ترآ، داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در منطقه، شـاخص‌های سـنجش‌ازدوری همچون TCI، VCI، VHI و SPI به‌منظور آشـکارسازی تغییرات رخ داده در بازه زمانی ۱۰ ساله (مادیس) و ۱۰ ساله (بارش، جهت صحت سنجی) می‌باشد.

درنهایت با توجه به پژوهش‌های اشـاره شـده در این بخش که در زمینه تحقیق حاضـر انجام گرفته می‌توان این گونه بیان نمود که تفاوت پژوهش حاضـر در این مقوله می‌باشـد که این پژوهش علاوه بر بررسـی معیارهای مورد سنجش قرارگرفته شده در پژوهش‌های پیشین، جهت پردازش از داده‌های مادیس MOD11A2 و MOD13A2 بهره گرفته شـد که یکی از پرکاربردترین Product هایی که در ارتباط با مادیس طراحی‌شـده، پروداکت پوشـش گیاهی و دمای سـطح زمین آن می‌باشـد که به‌صـورت ماهانه مورداسـتفاده قرار می‌گیرد، درحالی‌که در پژوهش‌های پیشین بیشتر تأکید بر سنجنده‌های لندست و قابلیت‌های آن بوده است، همچنین در این پژوهش برای بررسی تغییرات از روشـهای پایش سـنجش‌ازدوری همچون TCI، VCI و VHI که با توجه به اسـتانداردهایی که توسط ناسا ارائه شـده بهره گرفته شـد، همچنین در این پژوهش جهت مقایسـه و اعتبار سنجی روش‌های مذکور از شاخص SPI و ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید که به‌خوبی می‌تواند برای کاربردهای مختلف سطح زمین، مورداستفاده قرار گیرد.

محاسـبه SPI برای هر مکان، بر اسـاس ثبت بارش‌های طولانی‌مدت در دوره زمانی مورد نظر پایه‌گذاری شـده است. این شاخص از طریق معادله زیر قابل‌محاسبه می‌باشد.

$$SPI = (P_i - \overline{P})/S$$

1 Agnew
2 Mckee
3 Wu et al

که در آن Pi: مقدار بارش در دوره مورد نظر؛ $\overline{P}$: میانگین درازمدت بارش برای دوره مورد نظر و S: انحراف معیار مقدار بارش می‌باشد. برای محاسبه این نمایه، از توزیع گاما برای برازش داده‌های بارش استفاده می‌شود که پس از انجام محاسبه‌های لازم و تعیین پارامترهای مربوط به نمایه SPI انجام می‌گیرد. در جدول شماره ۲، رتبه‌بندی خشکسالی با شاخص‌های TCI ،VCI ،VHI و SPI نشان داده شده است.

جدول ۲- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های هواشناسی و سنجش‌ازدوری

شدت خشکسالی	VCI	TCI	VHI	SPI
خشکسالی حاد	<۱۰	<۱۰	<۱۰	<−۲
خشکسالی شدید	۱۰−۱۹/۵	۱۰−۱۹/۵	۱۰−۱۹/۵	−۲ تا ۱/۵
خشکسالی متوسط	۲۰−۲۹/۵	۲۰−۲۹/۵	۲۰−۲۹/۵	−۱/۵ تا −۱
نرمال	۳۰−۳۹/۹	۳۰−۳۹/۹	۳۰−۳۹/۹	−۱ تا ۱
ترسالی متوسط	۴۰−۴۹/۵	۴۰−۴۹/۵	۴۰−۴۹/۵	۱ تا ۱/۵
ترسالی شدید	۵۰−۵۹/۵	۵۰−۵۹/۵	۵۰−۵۹/۵	۱/۵ تا ۲
ترسالی حاد	>۶۰	>۶۰	>۶۰	>۲

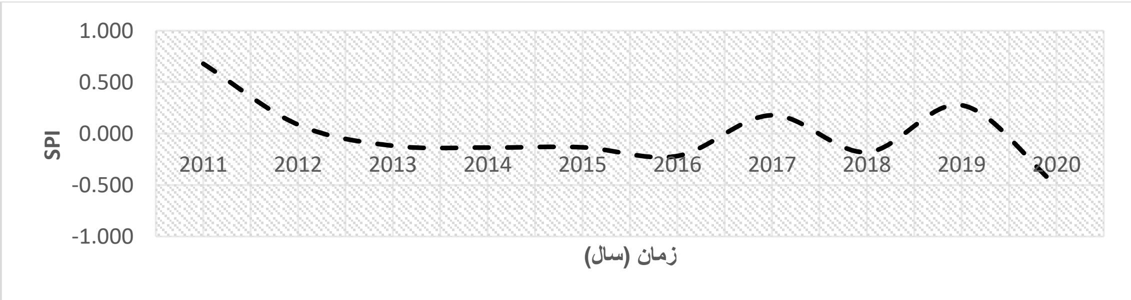
۳- نتایج و بحث

۳-۱- پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های هواشناسی

برای بررسی خشکسالی‌های رخ داده در استان‌های موردمطالعه از آمار و اطلاعات هواشناسی این استان‌ها استفاده شد. به دلیل تعداد زیاد نمودارهای مربوط به هر ایستگاه، تنها نتایج مربوط به کل منطقه آورده شده است. روند تغییرات نمایه SPI برای کل منطقه موردمطالعه در شکل ۳، نشان داده شده است. در ادامه، وضعیت خشکسالی در کلیه ایستگاه‌های موردمطالعه با استفاده از نمایه SPI سالانه برای دوره آماری ده ساله (۲۰۱۱-۲۰۲۰) بررسی شد. با بررسی تغییرات نمایه‌های خشکسالی در تمامی ایستگاه‌ها طی دوره آماری ده ساله، مشخص شد که در اکثر ایستگاه‌های استان‌های موردمطالعه، سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ خشکسالی‌های شدیدی رخ داده است. در پژوهشی که عزیزی و سفرراد در سال ۱۳۹۱ انجام دادند، با استفاده از نمایه اقیانوسی نینو، سال‌های النینو و لانینا را در دوره آماری ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ براساس شدت طبقه‌بندی کردند که بر اساس این طبقه‌بندی سال ۱۹۹۷ به‌عنوان سال النینو و سال ۲۰۲۰ به‌عنوان سال لانینا معرفی شدند. همچنین در پژوهش خورشید دوست و همکاران (۱۳۸۶) نیز سال ۲۰۱۶ که خشکسالی‌های فراگیر در جهان وجود داشته با فاز سرد پدیده انسو مطابقت داشته است؛ بنابراین علت رخداد

خشکسالی در سال‌های ۲۰۱٦ و ۲۰۲۰ در منطقه را می‌توان به علت وقوع پدیده لانینا در سطح کره زمین در این سال‌ها دانست.

سپس مقادیر این داده‌ها در دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۲۰ تفکیک و آزمون مقایسه میانگین برای این دوره انجام شد. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. همان طور که در این جدول دیده می‌شود، تفاوتی بین میانگین و واریانس دوره موردمطالعه وجود نداشته و نمایه‌های خشکسالی از روند خاصی پیروی نمی‌کنند؛ بنابراین تغییرات در این نمایه‌ها و وقوع سال‌های ترسالی و خشکسالی را می‌توان مربوط به نوسانات اقلیمی دانست.



شکل ۳- نمودار روند تغییرات نمایه SPI سالانه

جدول ۳- نتایج آزمون مقایسه میانگین و تحلیل واریانس نمایه SPI سری زمانی (۲۰۱۱-۲۰۲۰)

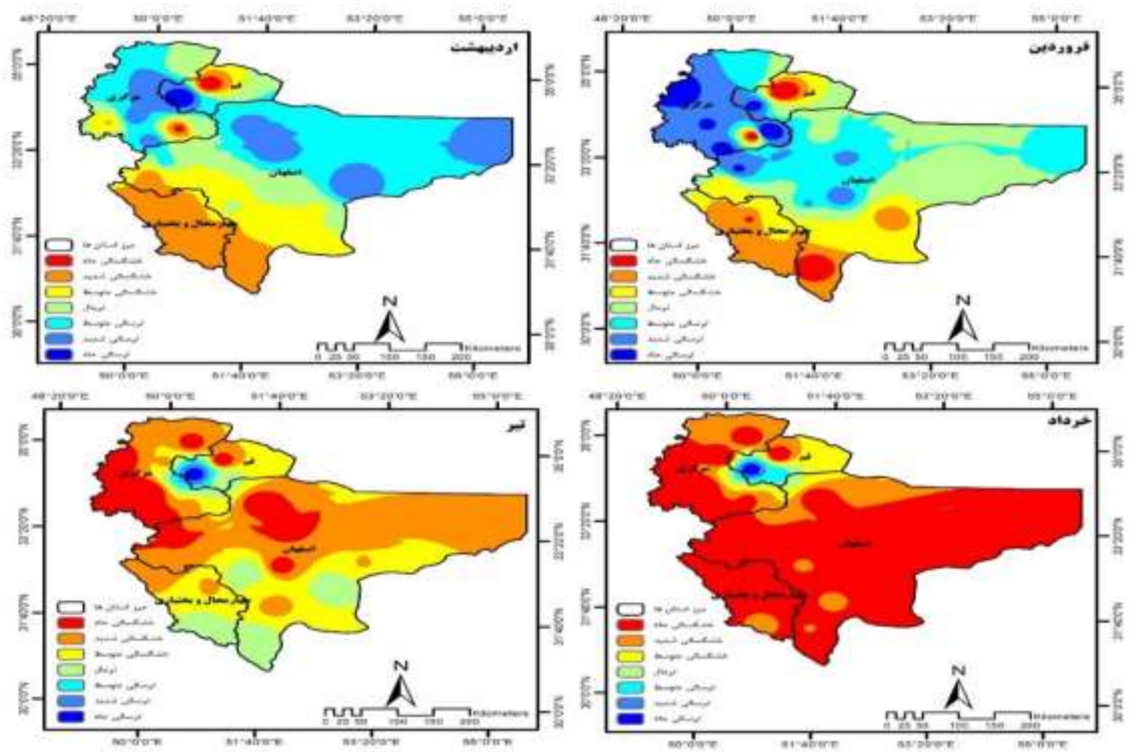
کل منطقه موردمطالعه	تحلیل واریانس		مقایسه میانگین	
	P-Value	آماره t	P-Value	آماره t
	۰/۱۸۵	۰/۵۹	۰/۷۱۲	۰/۳۸۵

یکی از پدیده‌های مخربی که هم اکنون در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک دنیا قابل مشاهده است، خشکسالی است. پایش این پدیده که خود ناشی از روش‌های مخرب بشری و همچنین ناهنجاری‌های اقلیمی است، یاری‌رسان خوبی برای ارزیابی آثار تغییرات اقلیمی بر روی سطح زمین است. شناسایی این پدیده و همچنین تعیین شدت و ضعف آن در مناطق مختلف ازجمله اقداماتی است که به جرأت می‌توان گفت تنها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های مختلف سنجش‌ازدور میسر می‌شود. با توجه به مباحث ذکر شده در ادامه نتایج حاصل از شاخص‌های VCI، TCI، VHI و SPI در قالب نقشه‌ها و جداول ارائه می‌گردد.

۳-۲- پهنه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI به‌صورت ماهانه

خشکسالی مخرب‌ترین پدیده اقلیمی است که در تمام نواحی اقلیمی اعم از مناطق خشک و نیمه‌خشک و مناطق نیمه مرطوب پدید می‌آید. استان‌های اصفهان، قم، چهارمحال و بختیاری و مرکزی به دلیل شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشکی که دارند، هر ساله تحت تأثیر این پدیده طبیعی و پیچیده قرار می‌گیرد. بر این اساس شدت بارندگی منطقه موردمطالعه در سال‌های مطالعاتی (۲۰۱۱-۲۰۲۰) و ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیر مورد ارزیابی واقع شد. بررسی‌های به عمل آمده در خشکسالی‌های رخ داده در ۲۹ ایستگاه هواشناسی در طول دوره آماری موردمطالعه بیانگر موارد زیر است:

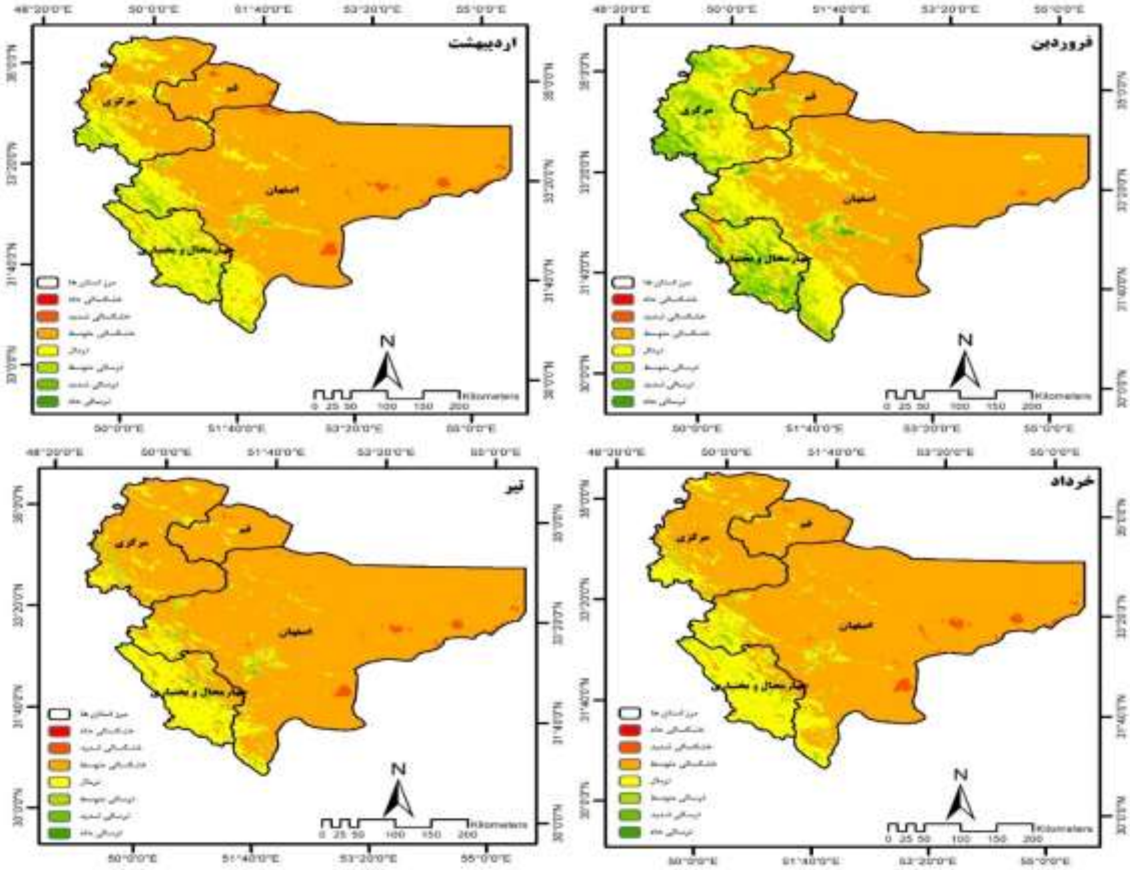
نتایج ارائه شده توسط شاخص SPI بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در خرداد ماه می‌باشد. به‌طوری که میانگین شاخص SPI در این ماه، ۲/۵۰۷- است. بر این اساس بخش‌های وسیعی از استان‌های اصفهان، چهارمحال و بختیاری و مرکزی با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در نواحی جنوب‌شرقی استان قم و بخش‌های شمالشرقی استان مرکزی از شدت خشکسالی آن‌ها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود (شکل ٤). همچنین بر پایه این شاخص، ماه فروردین به‌عنوان مرطوب‌ترین ماه منطقه محسوب می‌شود. در نواحی جنوبی استان‌های اصفهان و بخش وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری و همچنین مناطق شمالی استان قم به شدت خشکسالی‌ها در این ماه افزوده شده است. در این ماه میانگین شاخص SPI، ۲/٦۸ می‌باشد. بر اساس شکل شماره ٤، بخش‌هایی از پهنه‌های شمالی، شرقی و شمال‌غربی استان مرکزی و بخش وسیعی از استان اصفهان از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند.



شکل ٤- نقشه پهنه بندی خشکسالی منطقه موردمطالعه بر اساس شاخص SPI

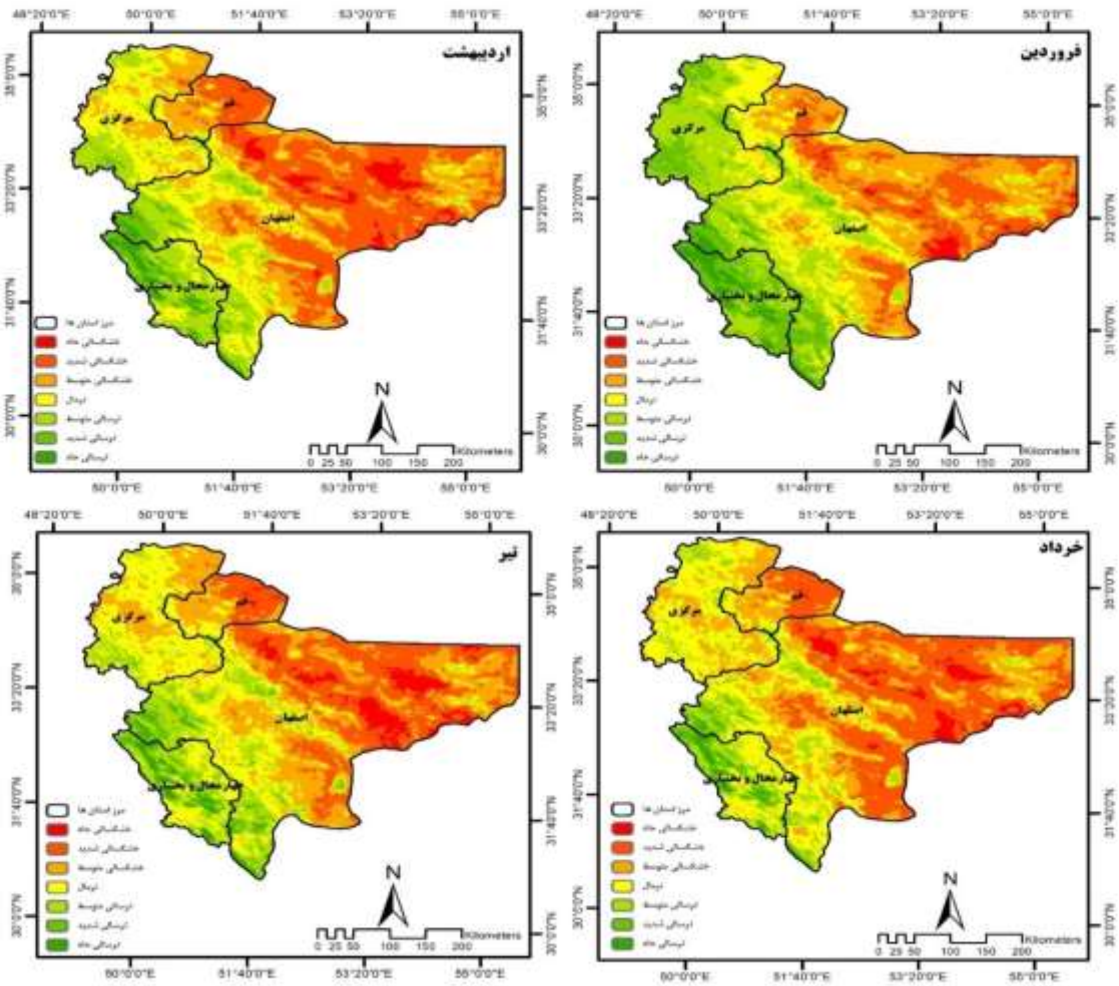
۳-۳- نتایج حاصل از شاخص‌های خشکسالی سنجش‌ازدوری VCI، TCI و VHI (ماهانه)

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر طبقه‌بندی شده توسط شاخص VCI (شکل ۵)، بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در تیر ماه می‌باشد. به‌طوری که میانگین شاخص مذکور در این ماه، ۲٦/۹٤ است. بر این اساس، بخش‌های وسیعی از استان‌های اصفهان، قم و مرکزی با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در نواحی جنوب‌غربی استان مرکزی و بخش‌های وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری از شدت خشکسالی آن‌ها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود (شکل ۵). همچنین بر پایه این شاخص، ماه فروردین به‌عنوان مرطوب‌ترین ماه منطقه محسوب می‌شود. در این ماه میانگین شاخص VCI، ۲۸/۳۱ می‌باشد. بر اساس شکل شماره ۵، بخش‌هایی از پهنه‌های شمالی، غرب و جنوب‌غربی استان مرکزی و بخش وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند. سپس در نواحی وسیعی از استان‌های اصفهان و قم به شدت خشکسالی‌ها در این دوره افزوده شده است.



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی خشکسالی منطقه موردمطالعه بر اساس شاخص VCI

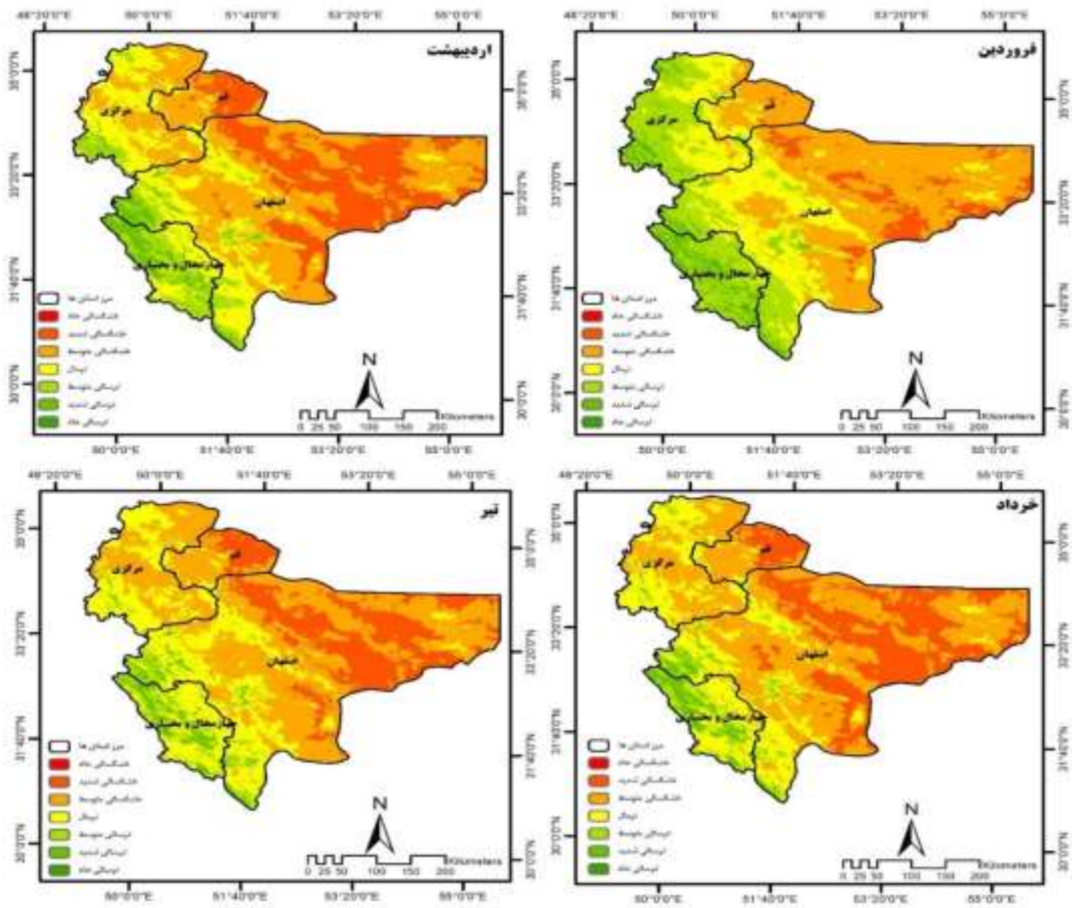
نتایج ارائه شده توسط شاخص TCI (شکل ٦)، ماه تیر بیانگر رخداد خشکسالی شدید در استان‌های موردمطالعه می‌باشد. به‌طوری که میانگین شاخص مذکور در این ماه، ۳۵/۳۱ است. بر این اساس، بخش‌های وسیعی از استان‌های اصفهان و قم با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در نواحی غربی و جنوب‌غرب استان اصفهان، قسمت‌های جنوبی استان مرکزی و بخش‌های وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری از شدت خشکسالی نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود (شکل ٦). همچنین بر پایه این شاخص، ماه خرداد به‌عنوان مرطوب‌ترین ماه منطقه محسوب می‌شود. در این ماه میانگین شاخص TCI، ٤٢/٦٣ می‌باشد. بر اساس شکل شماره ٦، بخش‌های وسیعی از استان چهار محال و بختیاری، نواحی غربی استان اصفهان و شمالی استان مرکزی از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند. سپس در نواحی وسیعی از استان‌های اصفهان و قم به شدت خشکسالی‌ها در این دوره افزوده شده است.



شکل ٦- نقشه پهنه‌بندی خشکسالی منطقه موردمطالعه بر اساس شاخص TCI

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر طبقه‌بندی شده توسط شاخص VHI (شکل ۷)، بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در تیر ماه می‌باشد. به‌طوری که میانگین این شاخص در این ماه، ۳۱/۱۲ است. بر این اساس بخش‌های وسیعی از استان‌های اصفهان و قم با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در قسمت‌های غربی استان اصفهان، جنوب‌غربی استان مرکزی و بخش‌های وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری از شدت خشکسالی آن‌ها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود (شکل ۷). همچنین بر پایه شاخص مذکور، ماه خرداد به‌عنوان مرطوب‌ترین ماه استان‌های موردمطالعه محسوب می‌شود. در این ماه میانگین شاخص VHI، ٣٤/٧٦ می‌باشد. بر اساس شکل شماره ۷، بخش‌های وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری، نواحی غربی و جنوب‌غرب استان اصفهان و جنوب استان مرکزی از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند. سپس در

نواحی وســیعی از استان‌های اصفهان و قم و همچنین بخش‌های مرکزی استان مرکزی به شدت خشکسالی‌ها در این دوره افزوده شده است.

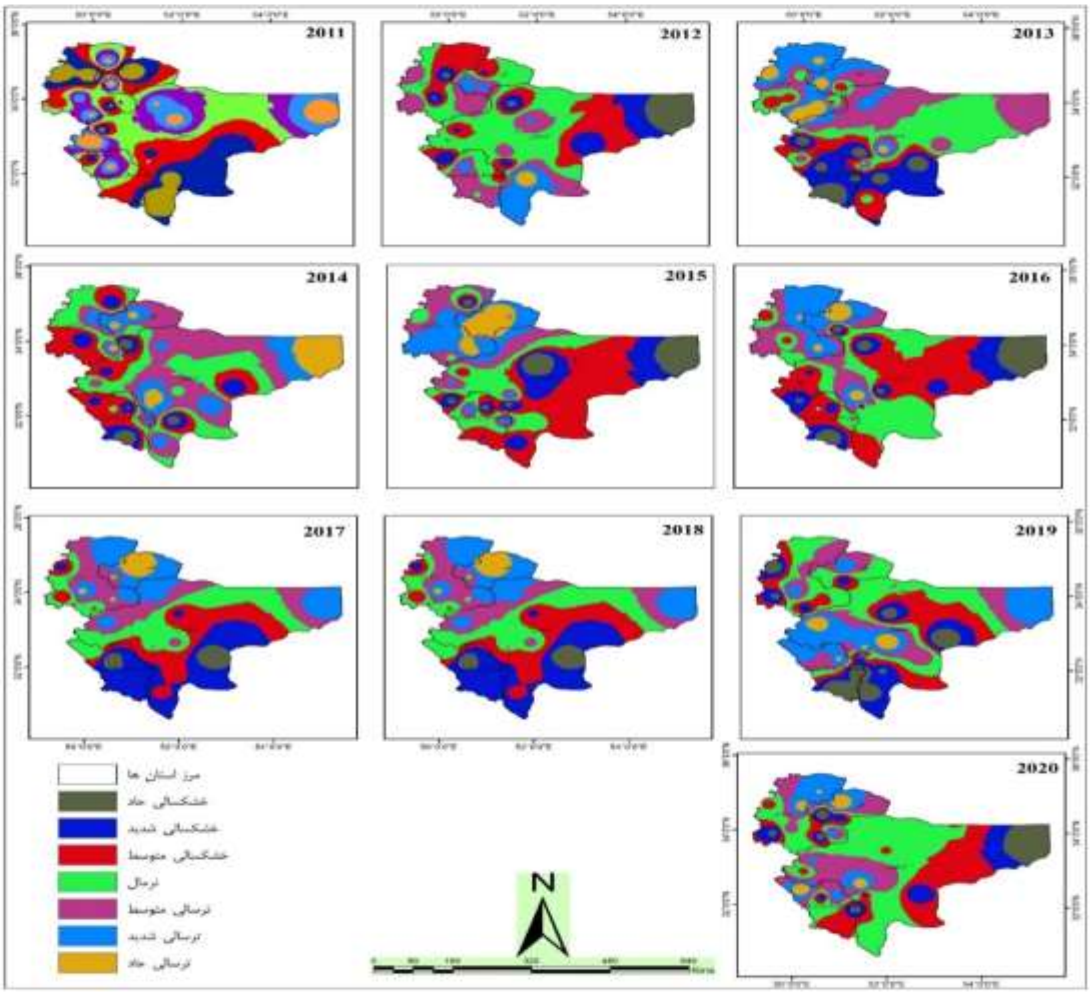


شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی خشکسالی منطقه موردمطالعه بر اساس شاخص VHI

٤-۳- پهنه‌بندی خشکسالی با استفاده از داده‌های زمینی به‌صورت سالانه (SPI سالانه)

نتایج ارائه شده توسط شاخص SPI بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در سال ۲۰۲۰ می‌باشد. به‌طوری که میانگین شاخص SPI در این سال، ۳/۲۳- است. بر این اساس، بخش‌های وسیعی از استان‌های اصفهان، چهارمحال و بختیاری و مرکزی با شــدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در نواحی جنوب‌شرقی اســتان قم و بخش‌های شــمال‌شــرقی اســتان مرکزی از شــدت خشکسالی آن‌ها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود (شکل ۸). همچنین بر پایه این شاخص، سال ۲۰۱۱ به‌عنوان مرطوب‌ترین سال منطقه محسوب می‌شود. در این سال

میانگین شـاخص SPI، ۳,۱۱ می‌باشـد. بر اساس شکل شماره ۸ بخش‌هایی از پهنه‌های شمالی، شرقی و شمال‌غربی اسـتان مرکزی و بخش وسـیعی از اسـتان اصـفهان از شـدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند. سپس در نواحی جنوبی اسـتان‌های اصـفهان و بخش وسـیعی از اسـتان چهارمحال و بختیاری و همچنین مناطق شـمالی استان قم به شدت خشکسالی‌ها در این سال افزوده شده است.

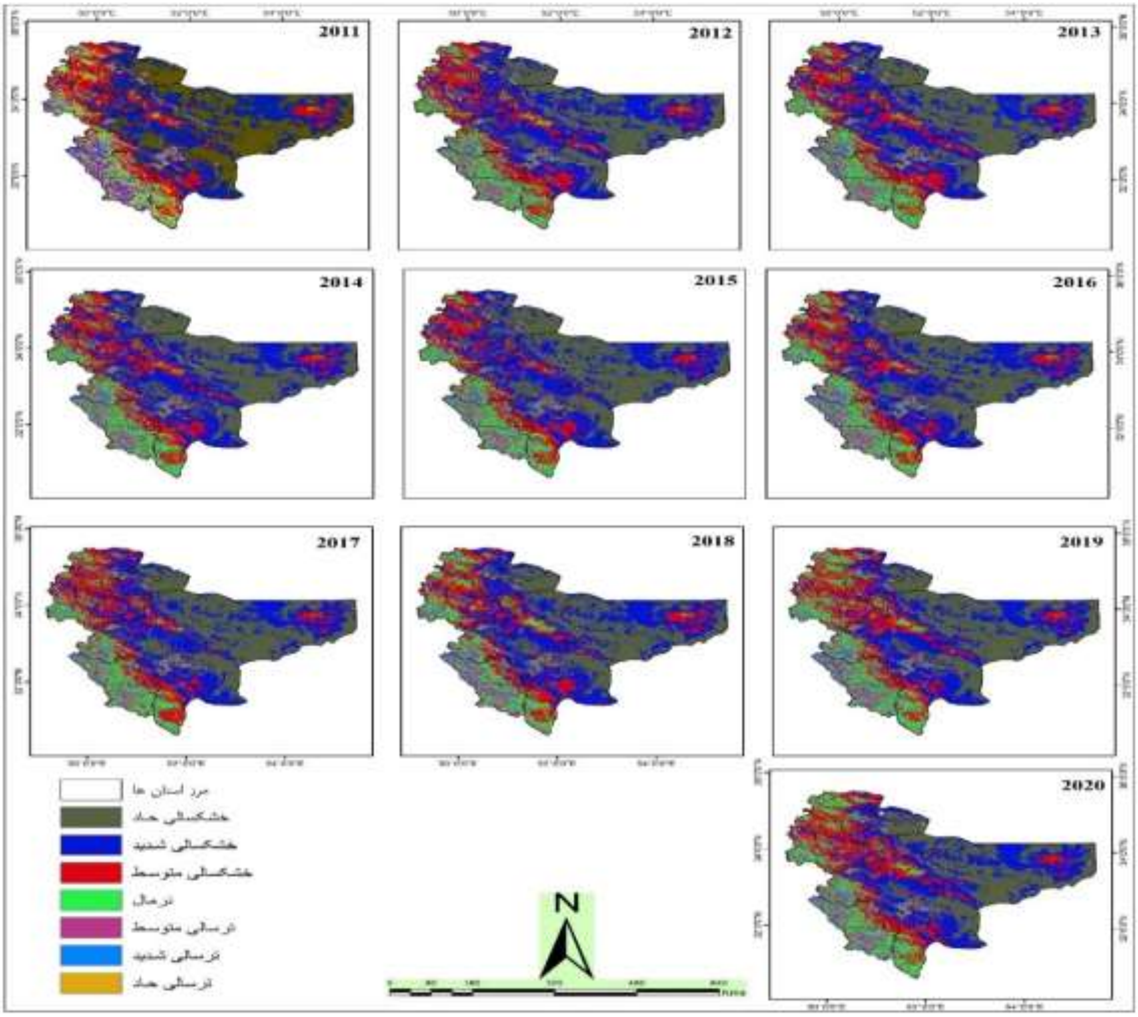


شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی خشکسالی منطقه موردمطالعه بر اساس شاخص SPI از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰

۳-۵- نتایج حاصل از شاخص‌های خشکسالی سنجش‌ازدوری VCI، TCI و VHI (سالانه)

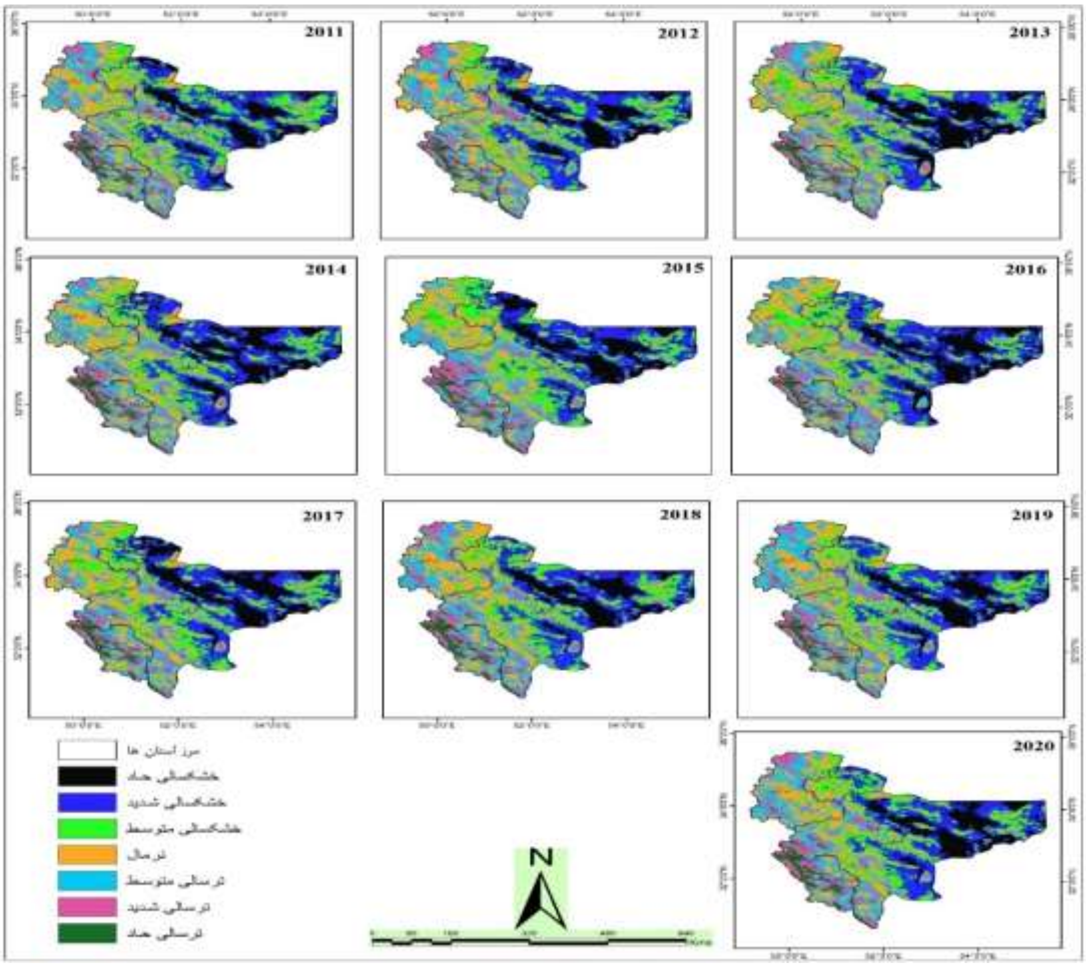
با توجه به نتایج به دسـت آمده از تصـاویر طبقه‌بندی شـده توسـط شـاخص VCI (شـکل ۹)، بیانگر رخداد خشـکسـالی شدید در منطقه در سال ۲۰۲۰ می‌باشد. به‌طوری که میانگین شاخص مذکور در این سال، ۱۷/۶۸ است.

بر این اســاس، بخش‌های وسیعی از استان‌های اصفهان، قم و مرکزی با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در نواحی جنوب‌غربی استان مرکزی و بخش‌های وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری از شـدت خشـکسـالی آن‌ها نسـبت به سایر مناطق کاسته می‌شود (شکل ۹). همچنین بر پایه این شاخص، سال ۲۰۱۱ به‌عنوان مرطوب‌ترین سـال منطقه محسـوب می‌شـود. در این سال میانگین شاخص VCI، ۳۸/۳٤ می‌باشد. بر اساس شـکل شـماره ۹، بخش‌هایی از پهنه‌های شـمالی، غرب و جنوب‌غربی اسـتان مرکزی و بخش وسـیعی از اسـتان چهارمحال و بختیاری از شـدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند. سپس در نواحی وسیعی از استان‌های اصفهان و قم به شدت خشکسالی‌ها در این دوره افزوده شده است.



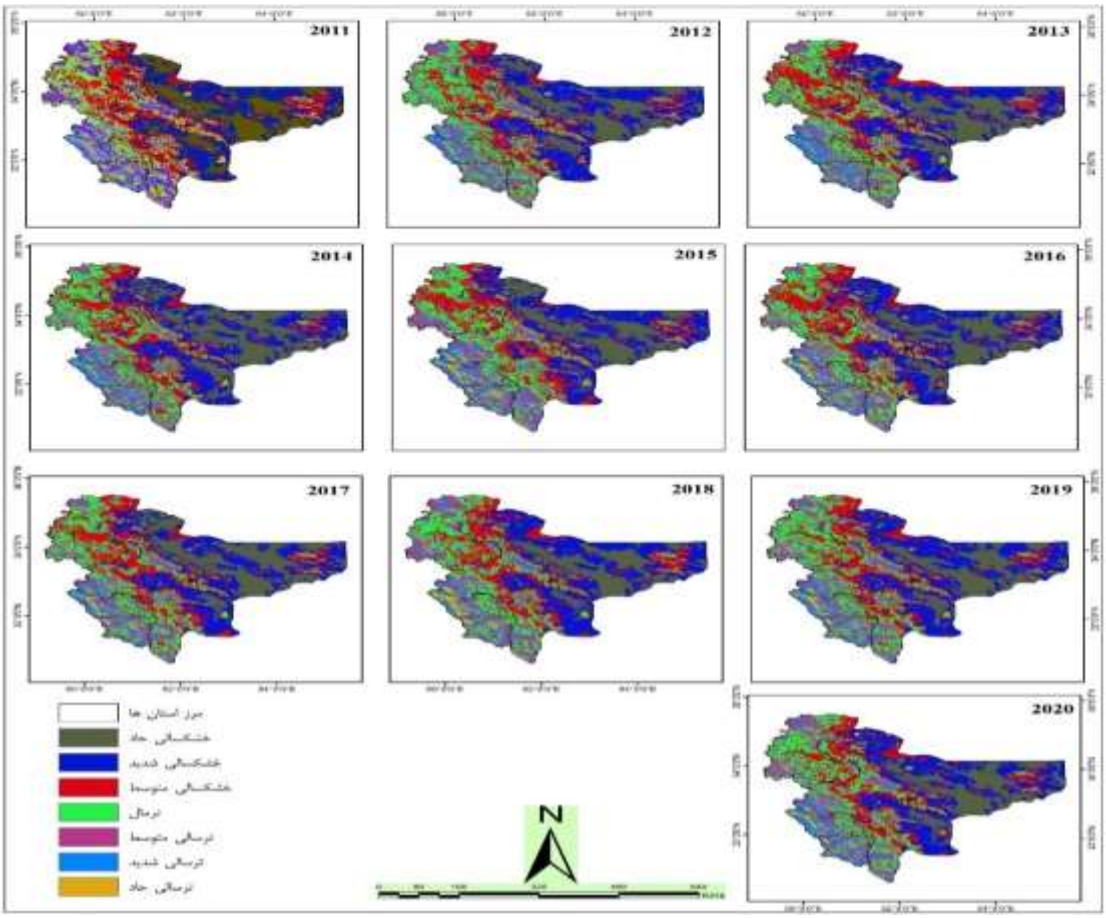
شکل ۹- نقشه پهنه بندی خشکسالی منطقه موردمطالعه بر اساس شاخص VCI از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر طبقه‌بندی شده توسط شاخص TCI (شکل ۱۰)، بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در سال ۲۰۱۳ می‌باشد. به‌طوری که میانگین شاخص مذکور در این سال، ۳۵/۸۲ است. بر این اساس، بخش‌های وسیعی از استان‌های اصفهان، قم و مرکزی با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در نواحی جنوب‌غربی استان مرکزی و بخش‌های وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری از شدت خشکسالی آن‌ها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود (شکل ۱۰). همچنین بر پایه این شاخص، سال ۲۰۱۶ به‌عنوان مرطوب‌ترین سال منطقه محسوب می‌شود. در این سال میانگین شاخص TCI، ۵۷/۲۲ می‌باشد. بر اساس شکل شماره ۱۰، بخش‌هایی از پهنه‌های شمالی، غرب و جنوب‌غربی استان مرکزی و بخش وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند. سپس در نواحی وسیعی از استان‌های اصفهان و قم به شدت خشکسالی‌ها در این دوره افزوده شده است.



شکل ۱۰- نقشه پهنه بندی خشکسالی منطقه موردمطالعه بر اساس شاخص TCI از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰

با توجه به نتایج به دست آمده از تصاویر طبقه‌بندی شده توسط شاخص VHI (شکل ۱۱)، بیانگر رخداد خشکسالی شدید در منطقه در سال ۲۰۲۰ می‌باشد. به‌طوری که میانگین شاخص مذکور در این سال، ۲۶/۹۱ است. بر این اساس بخش‌های وسیعی از استان‌های اصفهان، قم و مرکزی با شدت‌های بالاتری از خشکسالی در این دوره برخوردار بوده‌اند، سپس در نواحی جنوب‌غربی استان مرکزی و بخش‌های وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری از شدت خشکسالی آن‌ها نسبت به سایر مناطق کاسته می‌شود (شکل ۱۱). همچنین بر پایه این شاخص، سال ۲۰۱۶ به‌عنوان مرطوب‌ترین سال منطقه محسوب می‌شود. در این سال میانگین شاخص VHI، ۳۸/۰۴ می‌باشد. بر اساس شکل شماره ۱۱، بخش‌هایی از پهنه‌های شمالی، غرب و جنوب‌غربی استان مرکزی و بخش وسیعی از استان چهارمحال و بختیاری از شدت‌های ترسالی بالاتری برخوردار هستند. سپس در نواحی وسیعی از استان‌های اصفهان و قم به شدت خشکسالی‌ها در این دوره افزوده شده است.



شکل ۱۱- نقشه پهنه بندی خشکسالی منطقه موردمطالعه بر اساس شاخص VHI از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰

۶-۳- نتایج حاصل از همبستگی بین شاخص SPI و شاخص‌های خشکسالی سنجش‌ازدوری

در ادامه برای اطمینان از نتایج حاصل از شاخص‌های ماهواره‌ای، ضرایب همبستگی پیرسون بین نمایه‌های VCI، TCI و VHI و نمایه هواشناسی SPI در حالت میانگین دوره‌ای و همچنین همبستگی میان شاخص‌های ماهواره‌ای، برای ایستگاه‌های مورد نظر محاسبه شد. در جدول شماره ٤، ضرایب همبستگی پیرسون میان شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی آورده شده است.

با توجه به مقادیر جدول شماره ٤، ضریب همبستگی در ماه فروردین بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/۱۳ که دارای همبستگی مثبت معنادار کم، بین شاخص‌های SPI، VCI و SPI، VHI به ترتیب برابر با ۰/۷۷و ۰/٦١ که دارای همبستگی مثبت معنادار نسبتاً زیاد بوده است؛ بنابراین شاخص VHI و VCI همبستگی بیشتری را با بارش فروردین ماه داشته و نتایج قابل قبولی نسبت به شاخص TCI داشته است. ضریب همبستگی در ماه اردیبهشت بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/۲۲ که دارای همبستگی مثبت معنادار کم، بین شاخص‌های SPI و VCI برابر با ۰/۵۳که دارای همبستگی مثبت معنادار نسبتاً زیاد بوده است. همچنین SPI و VHI برابر با ۰/٤٣که نشان دهنده همبستگی مثبت معنادار زیاد می‌باشد؛ بنابراین شاخص VCI همبستگی بیشتری را با بارش اردیبهشت ماه داشته و نتایج قابل قبولی نسبت به شاخص VHIو TCI داشته است. ضریب همبستگی در ماه خرداد بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/٣٧که دارای همبستگی مثبت معنادارکم، شاخص‌های SPI و VHI برابر با ۰/٥٦که دارای همبستگی مثبت معنادار نسبتاً زیاد بوده است و بین شاخص‌های SPI و VCI برابر با ۰/٧٠ که نشان دهنده همبستگی مثبت معنادار زیاد می‌باشد؛ بنابراین شاخص VCI همبستگی بیشتری را با بارش خرداد ماه داشته و نتایج قابل قبولی نسبت به شاخص VHI و TCI داشته است. همچنین با توجه به مقادیر این جدول، ضریب همبستگی در ماه تیر بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/٣٢ که دارای همبستگی مثبت معنادارکم، SPI و VHI برابر با ۰/٥٧که دارای همبستگی مثبت معنادار نسبتاً زیاد بوده است و بین شاخص‌های SPI و VCI برابر با ۰/٦٥که نشان دهنده همبستگی مثبت معنادار زیاد می‌باشد؛ بنابراین شاخص VCI برای استان‌های موردمطالعه همبستگی بیشتری را با بارش تیر ماه داشته و نتایج قابل قبولی نسبت به شاخص TCI و VHI داشته است؛ بنابراین در مجموع، شاخص VCI همبستگی بیشتری با شاخص SPI هر چهار ماه داشته است.

جدول ٤- ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر شاخص SPI ماهانه و شاخص‌های ماهواره‌ای

ماه	شاخص	VCI	TCI	VHI
فروردین	SPI	۰/۷۷	۰/۱۳	۰/٦۱
اردیبهشت	SPI	۰/۵۳	۰/۲۲	۰/٤۳
خرداد	SPI	۰/۷۰	۰/۳۷	۰/٥٦
تیر	SPI	۰/٦٥	۰/۳۲	۰/٥۷

با توجه به مقادیر جدول شماره ۵، ضریب همبستگی سالانه بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/۲٤ که دارای همبستگی مثبت معنادار کم، بین شاخص‌های SPI، VCI و SPI، VHI به ترتیب برابر با ۰/٦۷ و ۰/٥٥که دارای همبستگی مثبت معنادار نسبتاً زیاد بوده است؛ بنابراین شاخص VHI و VCI همبستگی بیشتری را با بارش سالانه منطقه موردمطالعه داشته و نتایج قابل قبولی نسبت به شاخص TCI داشته است.

جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر شاخص SPI سالانه و شاخص‌های ماهواره‌ای

ماه	شاخص	VCI	TCI	VHI
سالانه	SPI	۰/٦۷	۰/۲٤	۰/٥٥

۳-۷- تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی به‌صورت سالانه

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول شماره ٦، بر اساس شاخص هواشناسی SPI، بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۲۰ در سال ۲۰۱۵ بوده است. به‌طوری که مساحت این طبقه به میزان ۸/۱۱ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه ۲ به‌عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید در مجموع ۳۹/۸۲ درصد از مساحت کل استان‌ها را در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ اشغال کرده است. سال ۲۰۱۵ نیز کلاس ۳ به‌عنوان مناطق دارای خشکسالی متوسط به میزان ۳۰/۹۷ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در سال ۲۰۲۰ طبقه نرمال به مقدار ۳٤/۷۷ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است. با توجه به جدول شماره ٦ که میزان درصد مساحت شاخص هواشناسی SPI را در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۲۰ نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که بیشترین درصد به میزان ۷/۷۹ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره آماری برای سال ۲۰۱٤ به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به سال ۲۰۱۹ می‌باشد که این سال به مقدار ۱۸/۰۸ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در سال ۲۰۱٤ نیز کلاس ۵ که به‌عنوان کلاس ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۲۹/۱٤ درصد از کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است.

با توجه نتایج به دست آمده از جدول شماره (٦)، بر اساس شاخص ماهواره‌ای VCI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره آماری ۲۰۱۱–۲۰۲۰ در سال ۲۰۱۵ بوده است. به‌طوری که مساحت این طبقه به میزان ۳۱/٦۳ درصـد از مسـاحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته اسـت. مسـاحت طبقه ۲ به‌عنوان مناطق دارای خشـکسالی شدید به مقدار ۳۲/۸۹ درصد از مساحت کل استان‌ها را در سال ۲۰۱۱ اشغال کرده است. سال ۲۰۲۰ نیز طبقه ۳ به‌عنوان مناطق دارای خشـکسالی متوسط به میزان ۲۱,۵۷ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در سال ۲۰۱۹ طبقه نرمال به مقدار ۱۳/٦۳ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته اسـت. با توجه به جدول شـماره (٦) که میزان درصـد مسـاحت شـاخص ماهواره‌ای VCI را در سال‌های ۲۰۱۱– ۲۰۲۰ نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که بیشترین درصد به میزان ۰/۸ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسـالی حاد در کل دوره آماری برای سـال ۲۰۲۰ به ثبت رسـیده اسـت. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسـالی شـدید نیز مربوط به سـال ۲۰۱۹ می‌باشد که این سال به مقدار ۲/۸۲ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصـاص داده اسـت. در سـال ۲۰۱۹ نیز کلاس ۵ که به‌عنوان کلاس ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۷/۳۵ درصد از کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است.

با توجه نتایج به دسـت آمده از جدول شماره ٦، بر اساس شاخص ماهواره‌ای TCI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره آماری ۲۰۱۱–۲۰۲۰ در سال ۲۰۱۷ بوده است. به‌طوری که مساحت این طبقه به میزان ۱٤/۱۳ درصـد از مسـاحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته اسـت. مسـاحت طبقه ۲ به‌عنوان مناطق دارای خشـکسالی شدید به مقدار ۲۲/۸۱ درصد از مساحت کل استان‌ها را در سال ۲۰۱٤ اشغال کرده است. سال ۲۰۱۵ نیز طبقه ۳ به‌عنوان مناطق دارای خشـکسالی متوسط به میزان ۱۸/۷۲ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در سال ۲۰۱۸ طبقه نرمال به مقدار ۲۱/٦٦ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است. با توجه به جدول شماره ٦ که میزان درصد مساحت شاخص ماهواره‌ای TCI را در سال‌های ۲۰۱۱–۲۰۲۰ نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که بیشترین درصد به میزان ۳/۳۸ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسـالی حاد در کل دوره آماری برای سـال ۲۰۲۰ به ثبت رسـیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شـدید نیز مربوط به سـال ۲۰۲۰ می‌باشـد که این سال به مقدار ۱۰/۷۵ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در سال ۲۰۱۹ نیز کلاس ۵ که به‌عنوان کلاس ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۱۹/۲۰ درصد از کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است.

با توجه نتایج به دست آمده از جدول شماره ٦، بر اساس شاخص ماهواره‌ای VHI، بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره آماری ۲۰۱۱–۲۰۲۰ در سال ۲۰۱٤ بوده است. به‌طوری که مساحت این طبقه به میزان ۲۱/۲۵ درصـد از مسـاحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته اسـت. مسـاحت طبقه ۲ به‌عنوان مناطق دارای

خشـکسالی شدید به مقدار ۲٤/۹۱ درصد از مساحت کل استان‌ها را در سال ۲۰۱۱ اشغال کرده است. سال ۲۰۱۳ نیز طبقه ۳ به‌عنوان مناطق دارای خشـکسالی متوسط به میزان ۲۲/۲٦ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در سال ۲۰۱۲ طبقه نرمال به مقدار ۱۹/۳۵ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است. با توجه به جدول شماره ٦ که میزان درصد مساحت شاخص ماهواره‌ای VHI را در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۲۰ نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که بیشترین درصد به میزان ۳/٤۳ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسـالی حاد در کل دوره آماری برای سـال ۲۰۱۸ به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور، بیشترین میزان ترسالی شـدید نیز مربوط به سـال ۲۰۱۵ می‌باشـد که این سـال به مقدار ۷/٤٤ درصـد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در سال ۲۰۲۰ نیز کلاس ٥ که به‌عنوان کلاس ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۱۳/۷۸ درصد از کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است.

جدول ٦- درصد مساحت طبقات خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی (سالانه)

شاخص	شدت	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱٤	۲۰۱٥	۲۰۱٦	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰
SPI	خشکسالی حاد	۷/۷۸	٦/۳۹	٥/۰٤	۱/۷۰	۸/۱۱	۸/۰۳	۳/٤۳	۳/٤۳	۷/۸۰	٦/۷۰
	خشکسالی شدید	۱۷/۸٤	۱۰/۲۱	۱٤/٥۱	٦/۳۳	۱۲/٤٦	۱۰/۸٦	۱۹/۹۱	۱۹/۹۱	۱۱/۳۲	۸/۲۱
	خشکسالی متوسط	۲۰/۸۷	۲۳/٤٦	۱۰/٤٤	۱۸/٦۳	۳۰/۹۷	۳۰/۷۷	۱۷/۹۲	۱۷/۹۲	۱۸/۰٦	۲۲/۱٤
	نرمال	۲۳/۷۹	۳۳/٦۲	۲٦/۰۳	۲٤/٤۲	۱٦/٥۹	۲۳/۷٤	۲۱/۸۷	۲۱/۸۷	۲٥/۸٤	۳٤/۷۷
	ترسالی متوسط	۱٤/۸۳	۱۸/۱۸	۲٦/۰٥	۲۹/۱٤	۱۲/۸۰	۱۲/۱۸	۱۷/۳٥	۱۷/۳٥	۱٦/۷۷	۱٦/٥٦
	ترسالی شدید	۱۰/۰٥	۷/۱۹	۱٤/۱۲	۱۱/۹۹	۱۳/۰۷	۱۲/۲۳	۱٦/٦۰	۱٦/٦۰	۱۸/۰۸	۹/۲۹
	ترسالی حاد	٤/۸٤	۰/۹٤	۳/۸۱	۷/۷۹	٦/۰۰	۲/۱۹	۲/۹۱	۲/۹۱	۲/۱۲	۲/۳۳
VCI	خشکسالی حاد	۲٦/۱۰	۲٤/۹۷	۲۸/۲۳	۲۸/۰۳	۳۱/٦۳	۲۹/۲٤	۲۹/٤۰	۲٦/۲۰	۲٦/٥٤	۲٤/۷٦
	خشکسالی شدید	۳۲/۸۹	۳۲/۸٤	۳۰/۲۸	۳۱/۲۲	۳۱/۳۷	۳۰/۱٥	۲۹/۹۲	۳۱/۸۹	۲۷/٤۹	۲۹/۲۰
	خشکسالی متوسط	۱۸/۹٥	۲۱/۳۱	۲۰/۱۸	۲۰/۱۳	۱۷/٤٦	۱۸/٦۲	۱۹/۸۳	۱۹/٥۲	۲۰/۸۳	۲۱/٥۷
	نرمال	۱۲/۱۲	۱۱/٦۹	۱۱/۷۱	۱۱/٤۰	۱۰/٦٤	۱۱/۷٤	۱۱/۸۱	۱۱/۸۷	۱۳/٦۳	۱۳/٤۷
	ترسالی متوسط	٦/۸۳	٦/۱٥	٦/٤۱	٦/۱۰	٥/۹٦	٦/۸٥	٦/۱۳	۷/۱۰	۷/۳٥	۷/۱۲
	ترسالی شدید	۲۰/۲۰	۲/۱۱	۲/۲٦	۲/۱۸	۲/۰۹	۲/٤۷	۲/۰۳	۲/٥۰	۲/۸۲	۲/٦۹
	ترسالی حاد	۰/٥٦	۰/٥۸	۰/٥۷	۰/٥۹	۰/٥۱	۰/٥۹	۰/٥۳	۰/٥٦	۰/۷۷	۰/۸۰
TCI	خشکسالی حاد	۱۰/٤۰	۱۱/۰٤	۱۳/۳٤	۱۳/۲٦	۱۲/٤۸	۱۲/۹۱	۱٤/۱۳	۱۰/۸۲	۱۱/۲۱	۱۱/٤۲
	خشکسالی شدید	۱۹/٤٥	۲۱/۱۲	۱۹/٦٦	۲۲/۸۱	۲۰/۲۰	۲۱/۹۸	۱۹/٥۹	۲۰/۱۰	۲۰/٤۸	۱۹/۷۱
	خشکسالی متوسط	۱۸/۱۷	۱٥/۱۳	۱٦/۹۲	۱٤/۳۱	۱۸/۷۲	۱٦/۷٦	۱۸/۱٤	۱٥/۸٥	۱٦/۰۰	۱٥/۷۱
	نرمال	۲۰/۷۱	۲۱/۰۱	۲۱/۰۱	۲۰/۸٦	۱۸/۸٥	۲۰/۳٤	۲۱/۱٦	۲۱/٦٦	۲۰/٦۳	۲۰/۲۲
	ترسالی متوسط	۱۷/۲٤	۱۸/۳۷	۱٦/۲۰	۱٦/۷٤	۱٦/۸۸	۱٦/۰۹	۱٥/۲٦	۱۸/٤۰	۱۹/۲۰	۱۸/٤۱
	ترسالی شدید	۱۰/۳۱	۱۰/۲۳	۹/٥٤	۸/٦۷	۹/٦۰	۸/۸۲	۸/٥۳	۱۰/۱٦	۹/٥٥	۱۰/۷٥

شاخص	شدت	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰
	ترسالی حاد	۳/۳۰	۲/۶۹	۲/۹۲	۲/۹۵	۲/۸۶	۲/۷۱	۲/۷۹	۳/۱۶	۲/۵۳	۳/۳۸
VHI	خشکسالی حاد	۱۶/۰۰	۱۶/۸۴	۱۶/۰۱	۲۱/۲۵	۱۶/۳۳	۱۷/۵۲	۱۹/۲۴	۱۳/۹۶	۱۵/۷۰	۱۶/۵۴
	خشکسالی شدید	۲۴/۹۱	۲۴/۶۳	۲۴/۳۲	۲۲/۹۶	۲۲/۵۳	۲۴/۲۶	۲۲/۴۴	۲۴/۹۳	۲۴/۷۸	۲۲/۸۸
	خشکسالی متوسط	۱۹/۷۳	۱۹/۲۸	۲۲/۲۶	۱۸/۵۹	۱۹/۲۸	۲۰/۰۶	۱۹/۶۶	۱۹/۰۵	۱۸/۳۳	۱۷/۶۴
	نرمال	۱۸/۳۴	۱۹/۳۵	۱۸/۷۴	۱۸/۳۶	۱۷/۶۷	۱۷/۲۹	۱۸/۰۹	۱۸/۶۲	۱۸/۸۲	۱۸/۷۵
	ترسالی متوسط	۱۲/۰۷	۱۱/۷۵	۱۰/۸۶	۱۰/۷۹	۱۲/۸۶	۱۱/۴۸	۱۱/۷۱	۱۳/۰۰	۱۲/۶۸	۱۳/۷۸
	ترسالی شدید	۶/۱۵	۵/۸۰	۵/۸۰	۵/۶۶	۷/۴۴	۶/۰۱	۵/۸۴	۶/۵۲	۶/۵۹	۷/۱۲
	ترسالی حاد	۲/۳۱	۱/۸۷	۱/۵۳	۱/۹۰	۳/۳۹	۲/۹۰	۲/۵۲	۳/۴۳	۲/۵۹	۲/۷۷

۳-۸- تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی به‌صورت ماهانه

با توجه نتایج به دســت آمده از جدول شماره ۷، بر اساس شاخص هواشناسی SPI، بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره چهار ماهه در ماه اردیبهشت بوده است. به‌طوری که مساحت این طبقه به میزان ۱۳/۰۲ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه دو به‌عنوان مناطق دارای خشکسالی شـدید به مقدار ۳۶/۷ کیلومتر مربع از مساحت کل استان‌ها را در ماه خرداد اشغال کرده است. ماه خرداد نیز در طبقه ســه به‌عنوان مناطق دارای خشـکســالی متوسـط به میزان ۳۶/۶۸ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در ماه تیر، طبقه نرمال به مقدار ۴۳/۸۲ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته اســـت. با توجه به جدول شـــماره ۷، که میزان مســـاحت شـــاخص‌های موردمطالعه را در ماههای فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیر را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که طبق شاخص SPI بیشترین مساحت به میزان ۲/۶۵ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره چهار ماهه برای ماه فروردین به ثبت رسیده است. طبق شـاخص مذکور، بیشــترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به ماه اردیبهشت می‌باشد که این ماه به مقدار ۱۳/۰۸ درصـد از کل مســاحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در ماه اردیبهشت نیز طبقه پنج که به‌عنوان طبقه ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۳۲/۷۸ درصد از کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است.

با توجه به جدول شـــماره ۷، بر اســاس شــاخص ســنجش‌ازدوری VCI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشــش خشــکســالی حاد در کل دوره چهار ماهه در ماه فروردین بوده است. به‌طوری که مساحت این طبقه به میزان ۳۴/۳۱ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه دو به‌عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۳۲/۳۵ درصـد از مساحت کل استان‌ها را در ماه تیر اشغال کرده است. ماه تیر نیز در طبقه سه به‌عنوان مناطق دارای خشـکســالی متوسـط به میزان ۱۹/۲ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در ماه فروردین طبقه نرمال به مقدار ۱۰/۸۶ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است. طبق

شـاخص VCI بیشـترین مسـاحت به میزان ۱/۵۹ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره چهار ماهه برای ماه فروردین به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به ماه اردیبهشـت می‌باشـد که این ماه به مقدار ٤/۷۷ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در ماه اردیبهشـت نیز طبقه پنج که به‌عنوان طبقه ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۸/٦۷ درصد از کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است.

با توجه به جدول شماره ۷، طبق شاخص سنجش‌ازدوری TCI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشش خشکسالی حاد در کل دوره چهار ماهه در ماه اردیبهشــت بوده اســت. به‌طوری که مســاحت این طبقه به میزان ۱۷/۰٤ درصد از مســاحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه دو به‌عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۲۲/۱٦ درصـد از مسـاحت کل اسـتان‌ها را در ماه فروردین اشغال کرده است. ماه تیر نیز در طبقه سه به‌عنوان مناطق دارای خشـکسـالی متوسط به میزان ۱۸/۷۸ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین در ماه خرداد طبقه نرمال به مقدار ۲۰/۰۱ درصـد از مســاحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته اســت. بر اسـاس شاخص TCI، بیشترین مساحت به میزان ۲/۸۷ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره چهار ماهه برای ماه تیر به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به ماه فروردین می‌باشـد که این ماه به مقدار ۱۱/۸۱ درصـد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در ماه فروردین نیز طبقه پنج که به‌عنوان طبقه ترسـالی متوسط می‌باشد، به میزان ۲۰/۸٦ درصد از کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است.

با توجه به جدول شــماره ۷، بر اســاس شــاخص ســنجش‌ازدوری VHI بیش‌ترین میزان مناطق تحت پوشــش خشـکسالی حاد در کل دوره چهار ماهه در ماه اردیبهشت بوده است. به‌طوری که مساحت این طبقه به میزان ۲۰/۰٦ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است. مساحت طبقه دو به‌عنوان مناطق دارای خشکسالی شدید به مقدار ۲٤/۲۸ درصـد از مسـاحت کل اسـتان‌ها را در ماه فروردین اشـغال کرده اسـت. ماه خرداد نیز در طبقه سـه به‌عنوان مناطق دارای خشــکســالی متوســط به میزان ۱۹/۵٦ درصــد از مســاحت کل منطقه موردمطالعه را به خود اختصــاص داده است. همچنین در ماه تیر طبقه نرمال به مقدار ۱۸/٤۷ درصد از مساحت کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته اســت. طبق شـاخص VHI بیشترین مساحت به میزان ٦/۰٤ درصد از مساحت کل منطقه برای کلاس ترسالی حاد در کل دوره چهار ماهه برای ماه فروردین به ثبت رسیده است. طبق شاخص مذکور بیشترین میزان ترسالی شدید نیز مربوط به ماه فروردین می‌باشد که این ماه به مقدار ۱۲/۰٤ درصد از کل مساحت منطقه را به این کلاس اختصاص داده است. در ماه فروردین نیز طبقه پنج که به‌عنوان طبقه ترسالی متوسط می‌باشد، به میزان ۱۳/۲۷ درصد از کل منطقه موردمطالعه را فرا گرفته است.

جدول ٧ – درصد مساحت طبقات خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی (ماهانه)

شاخص	ماه	خشکسالی حاد	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	نرمال	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی حاد
SPI	فروردین	٦/٦٥	١٨/١٦	١٥/٨٥	٣٠/٥٥	١٤/٨٨	١١/٦١	٢/٦٥
	اردیبهشت	١٣/٠٢	١٢/٠٣	١٤/١٧	١٤/٥٠	٣٢/٧٨	١٣/٠٨	٠/٧٧
	خرداد	١٢/٩٣	٣٦/٧٠	٣٦/٦٨	٩/٩٦	٢/٢٤	١/٣٧	٠/٤٨
	تیر	٥/٣٦	١١/٩٠	١٩/٩٩	٤٣/٨٢	١٧/٩٥	١/١٥	٠/٥١
VCI	فروردین	٣٤/٣١	٢٥/٧٩	١٤/٤١	١٠/٨٦	٨/١٨	٤/٧٤	١/٥٩
	اردیبهشت	٣٢/١٥	٢٨/٣١	١٤/١٠	١٠/٤٣	٨/٦٧	٤/٧٧	١/٤٥
	خرداد	٣٠/٦٨	٢٩/٩٩	١٦/٧٣	١٠/٨٠	٧/٨٠	٣/٢٢	٠/٦٧
	تیر	٣٠/٠٢	٣٢/٢٥	١٩/٢٠	١٠/٧٨	٥/٤٠	١/٧٧	٠/٤٦
TCI	فروردین	١١/٧٤	٢٢/١٦	١٥/٤٠	١٥/٩٦	٢٠/٨٦	١١/٨١	١/٩٧
	اردیبهشت	١٧/٠٤	٢١/١٧	١٧/٦٤	١٧/١٧	١٥/٨٣	٨/٦٧	٢/٣٧
	خرداد	١٦/٠١	٢١/٥٥	١٦/٩٣	٢٠/٠١	١٤/٨٧	٧/٩٢	٢/٥٩
	تیر	١٢/٥١	٢٠/٢٥	١٨/٧٨	١٨/٩٠	١٦/٩٢	٩/٦٣	٢/٨٧
VHI	فروردین	١٣/٧٩	٢٤/٢٨	١٦/٤٤	١٤/٠١	١٣/٢٧	١٢/٠٤	٦/٠٤
	اردیبهشت	٢٠/٠٦	٢٢/٩٩	١٨/١٢	١٤/٤١	١٠/٨٨	٨/٥١	٤/٩١
	خرداد	١٨/٥٩	٢٣/٣٧	١٩/٥٦	١٦/٧٠	١١/٧١	٦/٥٦	٣/٤٠
	تیر	١٥/٩٠	٢٢/٦٧	١٩/٥٤	١٨/٤٧	١٣/٠٨	٧/١٨	٣/٠٢

٤- جمع‌بندی

هدف از انجام این پژوهش، پایش خشکسالی استان‌های اصفهان، چهارمحال و بختیاری، مرکزی و قم بر اساس شاخص هواشناسی SPI و شاخص‌های ماهواره‌ای VCI، TCI و VHI با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS بوده است. با توجه به پژوهش انجام شده، بعد از محاسبه مقادیر شاخص‌ها و نیز تهیه نقشه‌های خشکسالی منطقه موردمطالعه به محاسبه همبستگی بین آن‌ها پرداخته شد. در این تحقیق برای اینکه شاخص خشکسالی هواشناسی SPIگستره خشکی را به‌طور دقیق نشان دهد از بازه زمانی سالانه آن استفاده شد که با مطالعات بذرافشان و همکاران (١٣٩٠) همخوانی دارد. چراکه آن‌ها در پایش خشکسالی استان گلستان با شاخص SPI به این نتیجه رسیدند که اگر از دوره‌های زمانی ماهانه شاخص SPI استفاده کنند وسعت خشکسالی‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از محاسبه شاخص SPI، در طول دوره آماری (٢٠١١–٢٠٢٠) از ٢٩ ایستگاه منطقه موردمطالعه، مشخص شده همبستگی معناداری در سطح ٠/٠١ بین این شاخص و نمایه ماهواره‌ای VCI وجود دارد. برای مثال، در نتایج به

دســت آمده از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI سالانه، در همه ایستگاه‌ها سال ۲۰۲۰ خشکسالی شدید و حاد رخ داده اســت. محاســبه شاخص VCI در این سال نیز نشان داد که میزان خشکسالی ضعیف به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته اســت که متناظر با آن مقادیر ماکزیمم شاخص خشکسالی VCI از سال ۲۰۱۹ به سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است. همچنین در همه ایســتگاه‌ها سال ۲۰۱۱ به‌عنوان سال ترسالی، میزان پوشش گیاهی نیز افزایش یافته که به‌خوبی نشان دهنده همبســتگی معنادار این دو شــاخص می‌باشــد که متناظر با آن در ســال ۲۰۱۰ به ســال ۲۰۱۱ مقادیر ماکزیمم شــاخص VCI افزایش یافته اســت که نشــان دهنده افزایش بارندگی در این سال است. در صورت در دسترس بودن تصــاویر ماهواره‌ای بدون پوشش ابر، امکان ارزیابی خشکسالی با شاخص‌های VCI، VHIو TCI نسبت به شاخص SPI، بســیار مناسب‌تر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شاخص VCI نسبت به شاخص‌های VHI و TCI نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین، شــاخص‌های با عامل وضعیت پوشش گیاهی VHI و VCI نتایج قابل‌قبول‌تری را نسبت به شاخص با عامل دما TCI ارائه می‌دهند.

نتایج این تحقیق نشــان داد اثرات خشــکسالی بر پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین متفاوت بوده و تابع عوامل مختلفی مانند ماه، نوع و خصــوصــیت پوشــش گیاهی و شرایط دمایی آن‌ها است. نتایج این مطالعه تأییدکننده وجود خشــکسالی و ترسالی به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۱ می‌باشد. این نتایج با توجه به شاخص SPI منطقه موردمطالعه که نشــان دهنده خشــکســالی و ترسالی در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۱ می‌باشد، تأیید شده است. با توجه به وجود همبســتگی بالا بین شــاخص SPI و داده‌های ماهواره‌ای، می‌توان نتیجه گرفت که تصاویر ماهواره‌ای از قدرت بالایی برای پایش و مدیریت خشــکســالی برخوردار می‌باشــند. نتایج این تحقیق مشــابه با نتایج ســلطانی و همکاران (۱۳۹۸)، حمزه و همکاران (۱۳۹٦)، غفوریان (۱۳۹۳) بود که نشــان دادند شــاخص‌های سنجش‌ازدوری دارای دقت مناسبی در پایش خشکسالی می‌باشد.

کتابنامه

امیدوار، کمال؛ ابراهیمی، رضا؛ راستی، فاطمه؛ ۱۳۹۳. ارزیابی برخی روش‌های زمین‌آمار در پهنه‌بندی شدت خشکسالی؛ مطالعه موردی منطقه شمالغرب و مرکزی ایران. مهندسی آبیاری، ۱۷ :۳۰-۴۳.

https://www.sid.ir/paper/247354/fa#downloadbottom

پرویز، لاله؛ خلقی، محمدرضا؛ ولیزاده کامران، خلیل؛ ۱۳۸۸. پایش خشکسالی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین حاصل ازتصاویر ماهواره‌ی Terra-MODIS، چهارمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب وخاک، آذر ۱۳۸۸، کرمان. ۱۰۷۳-۱۰۸۱.

پیش‌نماز احمدی، مجید؛ هوشمند، علی؛ زمانی، فهیمه؛ ۱۳۹٦. پایش خشکسالی شمال‌غرب کشور با استفاده از داده‌های MODIS و TRMM، بیست و چهارمین همایش ملی ژئوماتیک، اردیبهشت ۱۳۹٦.

https://www.sid.ir/paper/894192/fa

جهانبخش، سید؛ هادیانی، میرامید؛ رضایی‌بنفشه، مجید؛ دین‌پژوه، یعقوب؛ ۲۰۱۰. مدل‌سازی پارامترهای تغییر اقلیم در استان مازندران. مجموعه مقالات چهارمین کنگره بین المللی جغرافیدانان جهان اسلام (ICIWG)، ۱۳ص.

https://civilica.com/doc/82885

حمزه، سعید؛ فراهانی، زهرا؛ مهدوی، شهریار؛ چترآبگون، امید؛ غلام‌نیا، مهدی؛ ۱۳۹٦. پایش زمانی و مکانی خشکسالی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، موردمطالعه: استان مرکزی ایران. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال چهارم، شماره ۳. ص ۷۰-۵۳.

https://www.sid.ir/paper/264741/fa#downloadbottom

حجازی‌زاده، زهرا؛ جوی‌زاده، سعید؛ ۱۳۹۸. تحلیل آمار فضایی خشکسالی در ایران. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۱۹، شماره ۵۳، از صفحه ۲۵۱ تا صفحه ۲۷۷.

https://www.sid.ir/paper/102201/fa#downloadbottom

صلاحی، برومند؛ خورشیددوست، علی‌محمد؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ ۱۳۸٦. ارتباط نوسان‌های گردش جوی ـ اقیانوسی اطلس شمالی با خشکسالی‌های آذربایجان شرقی. نشریه پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ٦۰. صص ۱٤۷-۱۵٦. https://www.sid.ir/paper/5497/fa#downloadbottom

خدایی، مهسا؛ شاد، روزبه؛ مقصودی‌مهرانی، یاسر؛ قائمی، مرجان؛ ۱۳۹۵. تعیین یک شاخص بهینه چند سنسور سنجش‌ازدوری به‌منظور ارتقای فرایند پایش زمان واقعی خشکسالی در مناطقی با پوشش اراضی ناهمگن. اکوهیدرولوژی، دوره سوم، شماره سوم، تهران.

https://ije.ut.ac.ir/article_60041_ab91f234cd0f3799738362c9e487963c.pdf

خوش‌اخلاق، فرامرز؛ رنجبر، فیروز؛ طولابی، سوسن؛ مقبل، معصومه؛ معصومپور سماکوش، جعفر؛ ۱۳۸۹. بررسی خشکسالی در سال آبی ۱۳۸٦-۸۷ و اثرات آن بر منابع آب کشاورزی (نمونهٔ موردی: شهرستان مرودشت)، مجلهٔ جغرافیا، شمارهٔ ۲٤، صص ۱۱۹-۱۳٦ https://www.sid.ir/paper/5497/fa#downloadbottom.

سلطانی، میلاد؛ سلطانی، عادل؛ کله‌هوئی، مهین؛ سلیمانی، کریم؛ ۱۳۹۸. پایش خشکسالی منطقه‌ای با استفاده از تصاویر لندست، منطقه موردمطالعه: شهرستان کرمانشاه، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۸، شماره ۱۰۹، ص ۱۴۶-۱۳۸.https://www.sid.ir/paper/253284/fa#downloadbottom

عزیزی، قاسم؛ سفرداد، طاهر؛ ۱۳۹۱. تحلیل ویژگی‌های رودباد طی فازهای ENSO، مطالعه موردی؛ ۱۹۹۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰. نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی، سال سوم، شماره ۹، ص ۸۲-۷۰.

https://www.sid.ir/paper/403036/fa#downloadbottom

غفوریان، هادی؛ ثنائی‌نژاد، سیدحسین؛ داوری، کامران؛ ۱۳۹۳. بررسی تعیین مناطق مناسب جهت پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی (آب و خاک)، علوم و صنایع کشاورزی (۳). ۶۴۸-۶۳۹.https://www.sid.ir/paper/141927/fa#downloadbottom

نوروزی، اصغر؛ محمدی، زهرا؛ ۱۳۹۵. بررسی خشکسالی هیدرولوژیک و آثار آن بر کشاورزی منطقه لنجان. فصلنامه علمی-پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا). سال ششم، شماره دوم (پیاپی ۲۱)، ۱۱۶-۹۷.

https://doi.org/10.22108/sppl.2016.21633

محمودزاده، عبدالحسین؛ ثقفیان، بهرام؛ مختاری، احمد؛ ۱۳۸۷. بررسی همبستگی شاخص خشکسالی SPI و شاخص NDVI منطقه فریدون شهر، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب. دانشگاه تبریز. دانشکده مهندسی عمران. ۸ صفحه/https://civilica.com/doc/50191.

Agnew, C.T., 2000. using the SPI to Identify Drought, Drought Network News, Vol. 12, No. 1, winter 1999-Spring 2000. https:// digitalcommons.unl.edu/ cgi/ viewcontent.cgi? article= 1000& context=droughtnetnews

Bayarjargal, Y., Karnieli, A., Bayasgalan, M., Khudulmur, S., Gandush, C., Tucker, C. J., 2006. A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis. Remote Sensing of Environment, 105(1), 9-22. https:// www.sciencedirect.com/ science/ article/ abs/pii/S0034425706002185

Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., Sutera, A., 2003. Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. Water resources management, 17(4), 273-296. https:// link.springer.com/ article/ 10.1023/A:1024716530289

Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., Gregoire, J.M., 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. Remote Sensing of Environment, 77, Pp. 22–33. https:// www.sciencedirect.com/ science/ article/ abs/ pii/S0034425701001912

Chen, Z., Grasby, S.E., Osadetz, K.G., 2004. Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada, Journal of Hydrology, No. 290, 43–62. https:// www.sciencedirect.com/ science/ article/ abs/ pii/ S0022169403004852

Elhag, K., Zhang, W., 2018. Monitoring and Assessment of Drought Focused on Its Impact on Sorghum Yield over Sudan by Using Meteorological Drought Indices for the Period 2001–2011, Remote Sensing, Vol 10 (8), 1231 p. https://www.mdpi.com/2072-4292/10/8/1231

Fiorillo, F., Guadagno, F.M., 2010. Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI. Water Resources Management, 24(9): 1867-1884. https://link.springer.com/ article/ 10.1007/ s11269-009-9528-9

Hodel, E., 2012. Analysing Land Cover Change in Mongolia Using Terra MODIS Satellite Data supervisor Hans Hurni, Masterarbeit der Philosophisch, Universität Bern.
https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=4981

Ji, L., Peters, A.J., 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices, Remote Sensing of Environment, 87, 85-98pp. https:// www.sciencedirect.com/ science/ article/ abs/pii/S0034425703001743

Gu, Y., Brown, J., Verdin, J., Wardlow, B., 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. Geophysical Research Letters. 34. 551-560.https://www.sid.ir/FileServer/SF/7971392h01204

Karel, A.K., 1989. Response of Ootheca bennigseni (Coleoptera: Chrysomelidae) to extracts from neem. Journal of economic entomology, 82(6), 1799-1803. https:// www. semanticscholar. org/ paper/ Response- of -Ootheca-bennigseni -(Coleoptera%3A-to-from- Karel/ 8bf42bb 7bfb36f3310beadd1a3cf06ae60f785f6

Kogan, F.N., 2000. Global drought detection and impact: Assessment from apace, In Wilhite Editor Drought a Global Assessment, 1: 197-206.https://web.iitd.ac.in/~sagnik/C2.pdf

Lein, J., 2003. Integrated Environmental Planning, Black well scinse Inc U.S.A. https:// www.amazon.com/ Integrated- Environmental- Planning- Landscape- Synthesis ebook/ dp/ B000VI62QM

Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society Boston, MA, Pp: 179-183. https:// www.droughtmanagement.info/ literature/ AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf

Owrangi, M.A., Adamowski, J.M., Rahnemaei, A., Mohammadzadeh, R., Sharifan, R.A., 2011. Drought monitoring methodology based on AVHRR images and SPOT vegetation maps. Journal of Water Resource and Protection, 3(5): 325-346.

Pei, F., Wu, C., Liu, X., Li, X., Yang, K., Zhou, Y., Xia, G., 2018. Monitoring the vegetation activity in China using vegetation health indices. Agricultural and forest meteorology, 248, 215-227. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192317303210

Rostami, A., Bzane, M., Raini, M., 2016. Spatial and temporal monitoring of agricultural drought using Modis imagery and remote sensing technology. Journal of Soil and Water Science, 27: 213- 226 (in Persian). https://agry.um.ac.ir/ index.php/ article_ 37239. html?lang=en

Roswintiarti, O., Oarwati, S., Anggraini, N., 2010. Potential Drought Monitoring over Agriculture Area in Java Island, Indonesia, Indonesian National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), Progress Report of SAFE Prototype Year. http:// jurnal.lapan.go.id › article › download. PDF

Shahabfar, A., Ghulam, A., Eitzinger, J., 2012. Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 18: 119-127. https:// www.sciencedirect.com/ science/ article/ abs/ pii/ S030324341200013X

Silva, V.P.R., 2003. On Climate Variability in Northeast Brazil, Journal of Arid Environment, 54 (2): 256-367. http:// text2fa.ir/ wp-content/ uploads/ Text2fa.ir- On- climate-variabilityin-Northeast-of-Brazil.pdf

Thenkabail, P.S., Gamage, M.S.D.N., Smakhtin, V.U., 2003. The Use of Remote Sensing Data for Drought Assessment and Monitoring in Southwest Asia. Research report 85. 1-34. https:// www.unisdr.org/ files/ 1871_VL102138.pdf

Tsakiris, G., Vangelis, H., 2004. Towards a drought watch system baesed on spatial SPI. Water resources management, 18(1), 1-12. https:// link.springer.com/ article/ 10.1023/ B: WARM. 0000015410.47014.a4

Wu, H., Hayes, M.J., Weiss, A., Hu, Q., 2001. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score, International journal of climatology, Vol. 21, No. 6, pp. 745-758.https://rmets.onlinelibrary.wiley.com

Yıldırım, T., Aşık Ş., 2018. Index-based assessment of agricultural drought using remote sensing in the semi-arid region of Western Turkey. Journal of Agricultural Sciences, 24(4) : 510-516. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/339519

Zambrano, F., Lillo-Saavedra, M., Verbist, K., Lagos, O., 2016. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBío region in Chile using a 250 m resolution Vegetation Condition Index (VCI). Remote Sensing, 8(6): 530-549. https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/530